

Zum Geleit

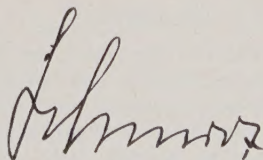
Wenn die Versorgung mit elektrischer Energie in Stadt und Land heute zur Selbstverständlichkeit geworden ist und der technische Stand der Verteilungs- und Übertragungsanlagen einen so hohen Sicherheitsgrad aufweist, daß der Abnehmer das Ausbleiben der Spannung als ein ungewöhnliches Ereignis empfindet, dann darf man nicht vergessen, daß dies dem Bemühen vieler Ingenieure zu verdanken ist, die seit dem Aufkommen der Elektrizität daran gearbeitet haben, die Versorgungsnetze ständig zu verbessern. Aber immer noch sind die Aufgaben und Anforderungen, welche die Stromversorgungsnetze an den Ingenieur stellen, nicht zu Ende, und sie werden vermutlich auch nie zu Ende gehen, solange es solche Netze gibt. Steigende Leistungsanforderungen, zunehmende Ausdehnung der Netze selbst und wachsende Kurzschlußbeanspruchung zwingen fortgesetzt zu neuen Überlegungen und Maßnahmen, um die Übertragungsfähigkeit der Netze zu erhöhen.

Für die Tagung der Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen, die in diesem Jahr am 16. und 17. Mai in Karlsruhe stattfand, sind aus der Fülle dieser Aufgaben zwei Themen zur Betrachtung der Verteilungsnetze bis einschließlich 110 kV herausgegriffen worden, die im Zuge der Weiterentwicklung der Stromversorgung derzeit im Vordergrund des Interesses stehen. Es sind dies die Sternpunktbehandlung der Netze und die Heraussetzung der Betriebsspannung auf die nächsthöhere Spannung, ein Vorgang, der üblicherweise kurz mit Netzumstellung bezeichnet wird.

Die Erfindung der Erdschlußspule durch *Petersen* im Jahre 1916 hat Deutschland zum klassischen Land dieser Art der Sternpunktbehandlung in Netzen gemacht. Mit der Ausdehnung der Netze und Erhöhung ihrer Betriebsspannungen gewann man aber die Erkenntnis, daß dieses Verfahren aus Gründen betrieblicher Zweckmäßigkeit auch seine Grenzen hat. Bei den Netzen mit 220 kV und darüber ist man bereits allgemein zur unmittelbaren Sternpunkterdung übergegangen. Es liegt daher nahe, zu untersuchen, ob bei Netzen mit 110 kV und darunter die mittelbare und unmittelbare Sternpunkterdung unter Umständen ebenfalls Vorteile bieten kann. Einige städtische Kabelnetze mit 110-kV-Betriebsspannung und vereinzelt auch einige Freileitungsnetze sind bereits erfolgreich zu dieser Art der Sternpunkterdung übergegangen. Es schien deshalb von besonderem Interesse, im Zuge der allgemeinen Netzentwicklung dieses Thema in einer umfassenden Aussprache zu behandeln.

Der ständige Lastanstieg in den Versorgungsnetzen zwingt zur Erhöhung ihrer Übertragungsfähigkeit. Folglich müßten mehr Leitungen und mehr Kabel verlegt werden. Andererseits werden die Schwierigkeiten, geeignete Leitungstrassen zu finden, mit der zunehmenden Dichte der Besiedlung und der mehr und mehr erkennbaren Abneigung der Bevölkerung, ihre Grundstücke für Zwecke der Leitungsführung zur Verfügung zu stellen, immer größer. Was liegt unter diesen Umständen näher, als anstelle neuer Leitungen die Betriebsspannung der vorhandenen zu erhöhen, wenn man damit den erwähnten Schwierigkeiten aus dem Weg gehen kann. Dabei bietet sich die Möglichkeit an, im Sinne der Vereinheitlichung künftig nur wenige bevorzugte Betriebsspannungen zu verwenden und hie und da die Zwischenwerte, sogenannte „krumme Spannungen“, auszumerzen.

Dieses und das nächste Heft enthalten sämtliche Vorträge, die im Rahmen der Veranstaltung in Karlsruhe über Sternpunktbehandlung und Netzumstellung gehalten wurden, ebenso die Diskussionsbeiträge. Die Aussprache, die sich jeweils an die Vorträge anschloß, beweist, welch reges Interesse an den behandelten Themen insbesondere bei den Versorgungsunternehmen, aber auch bei der Industrie sowohl im Inland als auch im Ausland besteht.



Dipl.-Ing. W. Schmidt

Vorsitzender des Verwaltungsrates der Studiengesellschaft
für Hochspannungsanlagen e. V., Mitglied des Vorstandes der
Energie-Versorgung Schwaben AG

Praxis der Sternpunktbehandlung in den verschiedenen Ländern für Netze mit Betriebsspannungen von 110 kV und darunter

Von Herbert Baatz, Stuttgart*)

DK 621.316.999.045.532 : 621.316.13.027.811.052.33

Grundsätzliches

Wenn in Deutschland die Frage der Sternpunkterdung in den letzten Jahren so lebhafte Erörterungen des Für und Wider hervorgerufen hat, so fragt man sich, welcher Art die wirklichen Bedenken sind im Gegensatz zu Ländern, die sich zu der Sternpunkterdung schon seit Beginn des Ausbaues ihrer Netze entschlossen haben, ohne auf ernsthafte Schwierigkeiten beim Betrieb dieser Netze gestoßen zu sein. Sie haben diese Praxis ihres Netzbetriebes seit Jahrzehnten entwickelt und sehen keine Veranlassung davon abzugehen, obwohl sie auch in kleinerem Umfange Netze mit Erdschlußlöschung betreiben und damit Erfahrungen gesammelt haben.

In den Ländern, die eine bestimmte bevorzugte Richtung der Sternpunktbehandlung in ihren Netzen verfolgt haben, ist die Entscheidung gegen Ende des ersten Weltkrieges getroffen worden. Zunächst lag der Betrieb mit isoliertem oder geerdetem Sternpunkt nahe, wobei man doch bald gefunden hatte, daß der isolierte Sternpunkt in Freileitungsnetzen hinsichtlich der Überspannungen, der Erfassung der Erdschlußstelle und des Relaischutzes gewisse Schwierigkeiten aufwies. Man fand, daß das Abschalten von unbelasteten Leitungen besser von den Schaltern bewältigt wird, wenn der Sternpunkt des Netzes direkt mit Erde verbunden ist.

Petersen erklärte 1917 den intermittierenden Erdschluß [1] und erfand die abgestimmte Erdschlußdrosselspule [2], die später mit seinem Namen in der ganzen Welt bekannt wurde. Es mag auf die Folgen des ersten Weltkrieges zurückzuführen sein, daß diese Erfindung im Ausland erst langsam bekannt wurde, als man sich dort schon zur Erdung des Sternpunktes entschlossen hatte.

Zwei Gründe dürften vor allem in Deutschland dafür maßgebend gewesen sein, daß die Petersenspule so schnell und weitgehend Eingang gefunden hat. Einerseits war es das unbeschränkte Privileg des Schwachstromes, d. h. der Post, auf die Benutzung der Erde für betriebliche Zwecke und andererseits das Bedenken hinsichtlich der Gefährdung von Mensch und Tier durch Schrittspannungen bei Erdschluß [3]. Beide Gründe haben aber in den anderen Ländern wohl nicht in gleichem Maße vorgelegen. In den USA betreiben Privatgesellschaften das Fernmeldewesen, mit denen sich die Elektrizitätsversorgungs-Unternehmen einigten. Die Beseitigung der Gefährdung sah man in der möglichst schnellen Abschaltung des Fehlers. Auch bei Netzen mit Kompensation des Erdschlußstromes wird die fehlerhafte Leitung bei einem bleibenden Erdschluß durch Kurzschließen der Erdschlußspule vom Relaischutz schnellstens abgeschaltet. Die Praxis, ein Netz mit Erdschluß eines Leiters längere Zeit zu betreiben, hat sich wegen der Möglichkeit der Ausweitung der Störung und der Zeitdauer des Gefahrenmomentes an der Erdschlußstelle im Ausland weniger herausgebildet.

Es sei kurz auf den Beginn der Entwicklung und den derzeitigen Stand der Sternpunktbehandlung in den uns besonders interessierenden Ländern eingegangen.

Entwicklung in Deutschland

In Deutschland wurde vor rd. 70 Jahren in Frankfurt a. M. ein 3-kV-Einphasennetz geschaffen, das zur Einschränkung der Überspannungserscheinungen einpolig über einen Wasserwiderstand von $3\ \Omega$ geerdet wurde [4]. Da zunächst konzentrische Kabel verwendet wurden, bei denen der Außenleiter geerdet war, gab es bei Fehlern keine Erdschlußprobleme, sondern nur Kurzschlußprobleme. Als man

nach der Jahrhundertwende zum Drehstrom überging, entstand ein Vierleiternetz für 5200 V, um die Einphasennetze mit dem Sternpunktleiter weiter betreiben zu können. Allerdings waren die Einphasentransformatoren im Dreieck geschaltet, so daß ein künstlicher Sternpunkt gebildet und die einphasigen Lasten möglichst gleichmäßig verteilt werden mußten. Der Sternpunkt war über eine Reaktanz von $3\ \Omega$ geerdet, so daß sich zusammen mit der Nullreaktanz des Sternpunktbildners eine Reaktanz von insgesamt $4\ \Omega$ ergab. Diese Betriebsart des 5-kV-Netzes, allerdings nach vollständiger Umstellung auf Drehstrom ohne Sternpunktleiter, besteht heute noch in Frankfurt a. M. Der höchstmögliche Erdkurzschlußstrom beträgt 750 A. Damit ist gezeigt, daß solche Netze auch in Deutschland schon seit Jahrzehnten betrieben werden und zu keinen Beanstandungen geführt haben.

In einem anderen städtischen Kabelnetz, und zwar dem 30-kV-Netz der Elektrizitätswerke Berlin, hat man im Jahre 1914 den Sternpunkt der Haupttransformatoren unmittelbar geerdet, um der Überspannungsgefahr zu begegnen [5]. Das Einverständnis der Postdirektion lag vor, Störungen im Fernsprechkreis traten nicht auf. Aber die einpoligen Kurzschlußströme ließen die Transformatoren „hüpfen“, die Zerstörung der Kabel und Muffen war erheblich, auf den Straßen wurde das Pflaster gehoben. Durch Erdung des Sternpunktes über einen Widerstand von $120\ \Omega$ wurde der Erdkurzschlußstrom dann von 1000 A auf 145 A begrenzt. Wenn auch die mechanischen Auswirkungen verschwanden, so führte der Erdschluß doch in kurzer Zeit zum Kurzschluß. Im Jahre 1921 wurde dann die Erdschlußspule im 30-kV-Netz eingeführt, nachdem im Jahre 1917 durchgeführte Versuche ihre Wirksamkeit bewiesen hatten. Man sah den Vorteil der Erdschlußspule darin, das Netz bei Erdschluß noch eine gewisse Zeit in Betrieb halten zu können.

Die erste Erdschlußspule wurde 1917 im 10-kV-Netz der Kraftwerk Altwürttemberg AG in Ludwigsburg in Betrieb genommen [6]. Sie wurde auf Anordnung von Petersen sofort mit 10 % Verstimmung betrieben. Der Siegeszug der Erdschlußspule begann, und sie hat dem damaligen Netzbetrieb erhebliche Vorteile gebracht.

Im Jahre 1925 hat dann Rachel auf der VDE-Tagung in Danzig auf die Vorteile der Sternpunkterdung in Höchstspannungsnetzen hingewiesen [7]. Er war der Ansicht, daß man die Erdung auf die Dauer auch bei 100 kV nicht wird entbehren können. Wohl aus den beiden anfangs angegebenen Gründen ist man aber doch bei der Erdschlußstromkompensation auch bei Spannungen bis 220 kV geblieben, bis in den letzten Jahren die zunehmende Ausdehnung der Netze Schwierigkeiten brachte. Der Ausbau der Fernmeldesysteme brauchte bis dahin somit keine Rücksicht auf die Energieversorgung zu nehmen. Das Privileg der Post auf die Benutzung der Erde blieb erhalten. Das Beispiel des 5-kV-Netzes von Frankfurt a. M. zeigt aber, wie sich das einmal verfolgte Prinzip der Erdung des Sternpunktes trotz starker Konkurrenz durch die Erdschlußspule vervollkommen läßt und zumindest zu gleichwertigen Betriebsbedingungen führen kann.

Überblick über Sternpunktsfragen im Ausland

In den Vereinigten Staaten von Amerika waren während des ersten Weltkrieges die Anschauungen noch sehr verschieden [8]. Im Osten des Landes erdete man den Sternpunkt, im Westen ließ man ihn isoliert. Man hat sich aber dann durchweg für die Erdung entschieden [9]. Bis 1925 hatte nur ein 44-kV-Netz von der Petersenspule Gebrauch gemacht, wobei diese bei bleibendem Erdschluß aber nach 2 s kurzgeschlossen wurde. Auch beim Schalten leerlaufender Leitungen hat man die Erdschlußspule über-

*) Prof. Dr.-Ing. H. Baatz ist Vorstand der Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen e. V., Nellingen über Eßlingen a. N.

brückt, um Überspannungen zu vermeiden. Beim weiteren Ausbau und Vermaschen des Netzes wurde zur direkten Erdung übergegangen [10].

Um in Netzen mit isoliertem Sternpunkt den Erdschlußlichtbogen an der Fehlerstelle zum Erlöschen zu bringen, war damals in Amerika der Erdungsschalter von *Creighton* und *Nicholson* eingeführt worden [11]. Bei Erdschluß legte er den betroffenen Leiter an Erde, zunächst kurzzeitig, dann dauernd, wenn der Erdschluß nicht verschwand. Damit wurde die Gefahr an der Erdschlußstelle im Netz vermieden. Dieses Verfahren findet heute in Frankreich auch für Netze mit über Reaktanz geerdetem Sternpunkt wieder Interesse.

Neben der Erdung über Drosselspulen oder Widerstände zur Begrenzung des Erdkurzschlußstromes wird auch heute in den USA in geringem Umfange, vorzugsweise in Strahlennetzen, der Sternpunkt über Petersenspulen geerdet [12]. Im Jahre 1947 war bei etwa 6,8 % der Netzlängen Erdschlußlöschung vorhanden. Versuche über den Potentialabfall bei Erdungen führten zu dem Hinweis, vielfache Rohrerdungen in Erdungs-Maschennetzen zu verwenden, damit die Spannungsunterschiede auf weite Strecken verteilt und die Gefährdungsmöglichkeiten in weitestem Maße vermindert werden konnten. Für den Bau von Erdungsanlagen in Stationen mit solchen Maschennetzen waren zunächst nur allgemeine Hinweise ausgearbeitet worden [13], die Angaben über Maschenweite, Leiterquerschnitte und Größe des Erdungsnetzes enthalten. Hinsichtlich der Erdung von Masten wird nur auf deren Bemessung gegen rückwärtige Überschläge bei Blitzeinschlag verwiesen.

Erst im Jahre 1958 sind Richtlinien für die Bemessung von Erdungsanlagen hinsichtlich der Berührungs- und Schrittspannungen herausgegeben worden [14]. *Ch. F. Dalziel* hat aus Versuchen, die an der Columbia Universität an Tieren vorgenommen wurden, die Folgerung gezogen, daß 99,5 % aller Menschen Strömen, die sich nach der Gleichung $I_K^2 t = 0,027 \text{ A}^2 \text{ s}$ ermitteln lassen, widerstehen können, ohne daß Herzkammerflimmern eintrete. I_K ist der Effektivwert des Stromes bei 60 Hz und t die Zeitdauer des Stromflusses. Diese Gleichung gilt nach den Versuchen nur für Zeiten zwischen 0,03 und 3 s. Demnach ergibt sich bei 1 s ein Strom von 165 mA und bei 0,1 s von 520 mA. Diese Gleichung wird in den Vereinigten Staaten von Amerika nach einem Bericht des Ausschusses des AIEE¹⁾ [14, 15] für die Berechnung der zulässigen Schrittspannung und der Berührungsspannung verwendet, wobei der Körperwiderstand zu 1000 Ω angenommen und der Erdübergangswiderstand eines Fußes gleich dem einer auf dem Erdboden aufliegenden runden Platte von 16 cm Dmr. gesetzt wird.

Die deutschen Vorschriften VDE 0141/11. 58 sehen in § 30 für die Prüfung von Erdungsanlagen Meßelektroden mit der gleichen Fläche ($F = 200 \text{ cm}^2$) vor, verlangen aber, daß die Schritt- und Berührungsspannung mit einem Spannungsmesser zu ermitteln sind, dessen innerer Widerstand nicht kleiner als 3000 Ω ist. Diese Meßvorschrift ist insofern nicht sinnvoll, als der Widerstand der Meßeinrichtung in die Messung eingeht. Legt man das amerikanische Rechenverfahren zugrunde, das einen Körperwiderstand von 1000 Ω annimmt, und läßt man den Übergangswiderstand von den Füßen zur Erde außer acht, so ergeben sich die folgenden Vergleichswerte mit den Schrittspannungen, die nach den deutschen Vorschriften außerhalb von Anlagen an verkehrsreichen Wegen zulässig sind.

Einwirkungsdauer in s		0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	3
Schrittspannung in V	VDE 0141	170	140	105	95	90	90	90	90
	amerikanische Werte	520	370	260	212	185	165	116	95

Der Vergleich zeigt, daß in den USA nach den Empfehlungen des AIEE-Komitees bei kurzer Einwirkungsdauer

weit höhere Schrittspannungen für zulässig angesehen werden als in Deutschland. Im Ausland zieht man die äußerst geringe Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Eintretens aller ungünstigen Umstände in Erwägung, wobei man sich auf die Erfahrung beruft. Die Tendenz geht in allen Ländern dahin, die jeweilige Einwirkungsdauer durch schnell arbeitende Relais und Schalter möglichst weitgehend herabzusetzen. Man ist sich bewußt, daß Maßnahmen zur Vermeidung einer Gefährdung notwendig sind, daß diese andererseits aber auch ihre Grenzen mit abnehmender Wahrscheinlichkeit haben.

In England hat es kaum bemerkenswerte Diskussionen über die Sternpunktbehandlung gegeben, denn die niederohmige Erdung ist fast überall eingeführt [16]. Bei Erdung über Petersenspulen hatte man früher vielfach Doppelerdschlüsse erhalten. Heute werden nur noch wenige Netze kleineren Umfanges mit Erdschlußlöschung betrieben. Die Erdschlußspule wird bei Erdschluß nach 10 s überbrückt.

In den 275- und 132-kV-Netzen sind die Sternpunkte der Transformatoren unmittelbar geerdet, in den 66-, 33-, 11- und 6,6-kV-Netzen über Widerstände, wobei der Erdkurzschlußstrom auf höchstens 1500 A begrenzt ist.

In Frankreich war es früher selten, daß der Sternpunkt von Hochspannungsnetzen unmittelbar mit Erde verbunden war. Eine einheitliche Praxis hat sich erst entwickelt, als die gesamte Elektrizitätsversorgung in der EdF²⁾ zusammengeschlossen wurde.

Die Sternpunktbehandlung der Mittelspannungsnetze ist während mehrerer Jahre untersucht worden. Man hat sich jetzt zur Erdung über eine Impedanz entschlossen, wobei in den Verteilungsnetzen der Erdkurzschlußstrom in Freileitungsnetzen auf höchstens 300 A, in Kabelnetzen auf höchstens 1000 A begrenzt wird, um ermüdende elektromagnetische Beanspruchungen und behindernde Auswirkungen auf benachbarte Fernspreitleitungen zu vermeiden.

Die wesentlichen Gründe für die Einführung dieser Praxis waren ein einfacher Netzschutz und die Tatsache, daß sich durch Kurzunterbrechung fast alle Fehler über Lichtbögen beseitigen lassen. Zudem hat die Erfahrung gezeigt, daß bei Verwendung von Lichtbogenhörnern als Schutzfunkenstrecken einpolige Lichtbögen an diesen vielfach von selbst erlöschen.

Bei empfindlichen Abnehmern können bei einpoligen Fehlern Erdschlußschalter im Netz eingesetzt werden, die den fehlerbehafteten Leiter 0,1 bis 0,3 s lang mit Erde verbinden, wodurch der Lichtbogen auf der Leitung erlöschen soll und mithin die Energielieferung nicht unterbrochen würde. Dieses Verfahren ist allerdings zunächst noch im Stadium des Versuchsbetriebes.

In Frankreich wird es schon als ernsthafte Gefahr angesehen, wenn ein Netz nur zwei bis drei Minuten im Erdschluß betrieben wird. Ein bleibender Erdschluß soll daher schnellstens abgeschaltet werden. An den Freileitungsmasten werden keine besonderen Erdungsmaßnahmen getroffen.

Als bedeutender Nachteil wird angesehen, daß durch Erdschlußspulen Überspannungen erzeugt werden können. Hierbei ist wohl an das Ausschwingen der magnetischen Energie der Spulen bei Schaltvorgängen gedacht, da Ventilableiter nicht verwendet werden.

Sowohl in den Ländern, die sich für die mittelbare oder unmittelbare Erdung des Sternpunktes entschieden haben, als auch in jenen, die ihre Hochspannungsnetze überwiegend mit Erdschlußlöschung betreiben, ist das jeweils bevorzugte Verfahren der Sternpunktbehandlung in der Praxis zu einer gewissen Vollkommenheit entwickelt worden. Mit isoliertem Sternpunkt werden Hochspannungsnetze im allgemeinen nur bei geringer Ausdehnung betrieben; der Erdschlußstrom muß kleiner als der Anregestrom der Schutzrelais bleiben. Bei Freileitungsnetzen ist zudem die Grenze dadurch gegeben, daß einpolige Erdschlußlichtbögen noch selbst löschen sollen. Beim Verfahren der Sternpunktterdung

1) AIEE = American Institute of Electrical Engineers.

2) EdF = Electricité de France.

soll eine Gefährdung an der Erdschlußstelle durch schnelle Abschaltung weitgehend vermieden werden, beim Verfahren der Erdschlußlöschung hingegen dadurch, daß über die Erdschlußstelle nur der Erdschlußstrom fließt.

Von den Fachleuten, welche die Sternpunktterdung bevorzugen, werden als weitere Vorteile herausgestellt: der einfache Relaischutz, die Festlegung der Spannung gegen Erde, geringere Überspannungen bei Schaltvorgängen, insbesondere bei Leitungsschaltungen, und die Vermeidung von Mehrfachfehlern. In vermaschten Netzen tritt auch bei Sternpunktterdung keine Unterbrechung der Energielieferung ein.

Als Vorteil der Erdschlußspule wird von deren Vorfachern angesehen: die Beseitigung von Erdschlußlichtbögen ohne Schaltvorgang, die kleinen Restströme bei Erdschluß und die geringere Beeinflussung von Fernmeldeleitungen. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, das Netz längere Zeit im Erdschluß zu betreiben, so daß die Abnehmer nicht zu lange abgeschaltet werden müssen.

Will man die einzelnen Vor- und Nachteile gegeneinander abwägen, so muß man auch die Häufigkeit der verschiedenen Fehlerarten sowie die wirtschaftlichen Aufwendungen berücksichtigen, die notwendig sind, um auch eine Fehlerart mit nur sehr geringer Häufigkeit zu erfassen. Bei Netzen mit Betriebsspannungen über 110 kV kann die Sternpunktterdung Vorteile in der Isolationsbemessung der Anlagen bringen, entweder eine erhöhte Sicherheit oder verminderte Kosten durch verringerte Isolation. Bei den Freileitungen wird man zwar die Isolation nicht geringer bemessen, dafür erhält man aber die erhöhte Sicherheit bei Fremdschichteinflüssen.

Diese Fragen stehen aber auf der diesjährigen Tagung nicht zur Diskussion. Es soll nur die Frage der Sternpunktbehandlung in Netzen von 110 kV und darunter behandelt werden. Über die 110-kV-Freileitungsnetze ist bereits auf

der Tagung der Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen in Hamburg 1957 gesprochen worden, so daß in den folgenden Vorträgen vorzugsweise über die Stadtnetze, bei denen die Kabel überwiegen, berichtet werden soll, sowie über die Sternpunktbehandlung in Verteilungsnetzen, die auch in zunehmendem Maße verkabelt werden.

Schrifttum

- [1] Petersen, W.: Der aussetzende (intermittierende) Erdschluß. ETZ Bd. 38 (1917) S. 553–555 und S. 564–566.
- [2] Petersen, W.: Die Begrenzung des Erdschlußstromes und die Unterdrückung des Erdschluß-Lichtbogens durch die Erdschlußspule. ETZ Bd. 40 (1919) S. 5–7 und S. 17–19.
- [3] Rüdenberg, R.: Über den räumlichen Verlauf von Erdschlußströmen. ETZ Bd. 42 (1921) S. 847–848.
- [4] Lenz, F.: Betrieb von Kabelnetzen mit kurzgeerdetem Sternpunkt. Elektr.-Wirtsch. Bd. 56 (1957) S. 155–158.
- [5] Neumann, E.: Die Erdung der Neutralen in Kabelnetzen, Versuche mit Erdschlußspulen im 30 kV-Kabelnetz der Städtischen Elektrizitätswerke Berlin. ETZ Bd. 45 (1924) S. 261–266.
- [6] Auerheimer, R.: Zur Frage der Erdschlußspulen. ETZ Bd. 43 (1922) S. 199.
- [7] Rachel, A.: Höchstspannungsfragen und Nullpunktserdung. ETZ Bd. 46 (1925) S. 1347–1350; ETZ Bd. 47 (1926) S. 289–294 und S. 333 bis 339.
- [8] Vedovelli, E.: Rapport sur la mise du neutre à la terre. CIGRE-Ber. 1921, S. 1016–1034.
- [9] Stone, E. C., u. Woodruff, W. W.: Present day practices in grounding of transmission systems. First report of Subcommittee on Grounding of Protective Devices Committee AIEE. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. Bd. 42 (1923) S. 446–469.
- [10] Stone, E. C.: Die amerikanische Praxis in der Erdung der Neutralen. ETZ Bd. 46 (1925) S. 1355–1361.
- [11] Petersen, W.: Erdschlußströme in Hochspannungsnetzen. ETZ Bd. 37 (1916) S. 493–496 und S. 512–514.
- [12] Present day grounding practices on power systems. Third AIEE report on system grounding. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. Bd. 66 (1947) S. 1525.
- [13] Knowlton, A. E.: Standard Handbook for Electrical Engineers. McGraw Hill Book Company, New York 1949.
- [14] Voltage gradients through the ground under fault conditions. AIEE Committee Report. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. (III) Bd. 77 (1958) S. 669–692.
- [15] Guide for safety in alternating-current substation grounding. AIEE-Ber. Nr. 80 (März 1961).
- [16] Beard, J. R.: Doit on mettre à la terre le neutre des réseaux à haute tension? CIGRE-Ber. 1923, S. 947–958.

Die Behandlung des Sternpunktes in städtischen Kabelnetzen

Von Rudolf Mestermann, Hannover*)

DK 621.316.99.052.33 : 621.315.2

Grundsätzliches

Die derzeitige Entwicklung der Übertragungs- und Verteilungsnetze ist bedingt durch eine rasche, zuweilen beinahe sprunghafte Zunahme des Energiebedarfs. Gerade in städtischen Kabelnetzen mit hohem Industrieanteil erfordern die wachsende Ausdehnung der Netze, der Übergang zu höheren Übertragungsspannungen und nicht zuletzt auch der Wunsch nach größtmöglicher Betriebssicherheit eine ausreichende Elastizität im Aufbau dieser Netze. Hierbei spielt die Art der Sternpunktbehandlung und deren Auswirkungen auf den Verlauf von Strom und Spannung bei Kurz- und Erdschlüssen eine wesentliche Rolle.

Die geschichtliche Entwicklung führte in Deutschland vom freien Sternpunkt sehr rasch etwa ab 1920 zur Erdschlußlöschung, die auch heute noch bei Spannungen bis 110 kV überwiegt. Österreich, die Schweiz und Skandinavien schlossen sich dieser Entwicklung weitgehend an. In den USA ging man ebenso konsequent zur niederohmigen Sternpunktterdung über, die auch in England und Frankreich vorwiegend angewendet wird.

Die Einführung verschiedener Betriebsweisen in Deutschland und den USA ist einmal auf die Erfindung der Erdschlußspule durch Petersen in Deutschland, zum anderen wohl aber auch darauf zurückzuführen, daß — in früheren Jahrzehnten durch die räumlichen Entfernungen, später

durch Kriegseignisse — voneinander getrennte Länder durch teilweise zufällige Erfahrungen zu bestimmten Betriebsweisen gelangt sind, die eine allgemeine Gültigkeit durchaus nicht für sich beanspruchen können. Der in neuerer Zeit erfreulich rege Meinungs- und Erfahrungsaustausch hat dann dazu geführt, daß man auch ausländische Methoden gegenseitig prüfte und gegebenenfalls anwendete.

Technische und wirtschaftliche Grenzen der Erdschlußlöschung führten auch in Europa — zunächst bei höchsten Übertragungsspannungen — zu der in den USA vorwiegend geübten Praxis der niederohmigen Sternpunktterdung, bei welcher der Sternpunkt unmittelbar oder mittelbar über strombegrenzende Einrichtungen, wie niederohmige Impedanzen, Reaktanzen oder ohmsche Widerstände geerdet ist. Auch in vermaschten städtischen Kabelnetzen, in denen man den wesentlichen Vorteil der Erdschlußlöschung in Freileitungsnetzen, nämlich die selbsttätige Fehlerbeseitigung, weitgehend entbehren muß, beginnt in Deutschland allmählich die Anwendung der niederohmigen Sternpunktterdung. Während so in Deutschland diese Art der Sternpunktbehandlung in Mittelspannungsnetzen Eingang findet, steht man in den USA der Erdschlußlöschung nicht mehr so ablehnend gegenüber wie früher.

Die Frage, welche Art der Sternpunktbehandlung zu bevorzugen sei, ist keineswegs immer eindeutig zu beantworten, und es soll deshalb Aufgabe dieses Aufsatzes sein, wesentliche Gesichtspunkte für und wider die eine oder andere Lösungsmöglichkeit zur Diskussion zu stellen. Nach einleitenden allgemeinen Betrachtungen über das Drehstromnetz mit freiem Sternpunkt, die Erdschlußlöschung und

*) Dipl.-Ing. R. Mestermann ist Direktor des Städtischen Elektrizitätswerks Hannover (Stadtwerke Hannover).

Der Verfasser dankt Dipl.-Ing. M. Erche und Dipl.-Ing. E. Löns wertvolle Unterstützung und Hinweise bei der Vorbereitung der Arbeit; er dankt ferner zahlreichen städtischen Elektrizitätsversorgungs-Unternehmen und Firmen für bereitwillige Auskunfterteilung und Bereitstellung von Unterlagen.

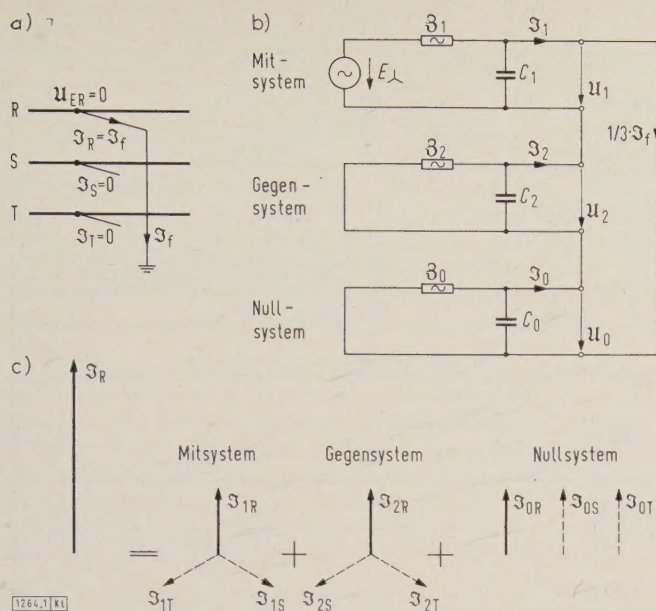


Bild 1. Prinzipschaltungen und Zeigerbild zur Berechnung eines einphasigen Erdfehlers mit symmetrischen Komponenten.

a) schematische Darstellung der Fehlerstelle als Leitungsabzweig, b) Schaltung der Komponentennetze, c) Zeigerbild.

niederohmige Sternpunktterdung bei einphasigem Erdfehler sollen kurz die derzeit gültigen Leitsätze und Vorschriften besprochen und die (leider) recht mannigfachen Begriffe erläutert werden. Insbesondere werden dabei auch die amerikanischen Ansichten über die verschiedenen Bereiche der niederohmigen Sternpunktterdung behandelt. Anschließend wird dann über das Ergebnis einer Umfrage bei einer Reihe westdeutscher städtischer Energieversorgungsunternehmen über die Art der Sternpunktbehandlung und die Fehlerhäufigkeit in diesen Netzen berichtet. Die verschiedenartigen Gesichtspunkte für und wider die eine oder andere Art der Sternpunktbehandlung sollen dabei erörtert werden.

Zunächst ist es für die Kennzeichnung und Beurteilung der Wirksamkeit der verschiedenen Arten der Sternpunktbehandlung notwendig, die Impedanzen des Fehlerstromkreises zu kennen.

Impedanzen des Fehlerstromkreises

Anwendung der symmetrischen Komponenten

Bei der Berechnung der Ströme und Spannungen während unsymmetrischer Fehler in Drehstromnetzen wendet man zweckmäßig die Rechenverfahren mit Komponentensystemen an. Bekannt geworden sind hier vor allem die symmetrischen Komponenten [1 bis 3].

Sie führen zur Zerlegung eines unsymmetrischen Spannungs- oder Stromsystems in seine symmetrische Mit-, Gegen- und Nullkomponenten. Bei einem einphasigen Erdschluß des Leiters R fließt nur, wie Bild 1a zeigt, von diesem Leiter ein Fehlerstrom zur Erde. Der Fehlerstrom I_f ist dabei gleich dem kapazitiven Erdschlußstrom, dem Reststrom oder dem Erdschlußstrom, je nach der Art der angewandten Sternpunktterdung. Bei einem widerstandslosen Erdschluß ist ferner die Spannung U_{ER} an der Fehlerstelle gleich Null. Setzt man diese Bedingungen in die bekannten Grundgleichungen der symmetrischen Komponenten ein, dann ergeben sich folgende Bestimmungsgleichungen für die Komponenten:

$$U_{ER} = U_0 + U_1 + U_2 = 0, \quad (1a)$$

$$U_{ES} = U_0 + a^2 U_1 + a U_2, \quad (1b)$$

$$U_{ET} = U_0 + a U_1 + a^2 U_2, \quad (1c)$$

$$I_R = I_0 + I_1 + I_2 = I_f, \quad (2a)$$

$$I_S = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = 0, \quad (2b)$$

$$I_T = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = 0. \quad (2c)$$

Aus Gl. (2b) oder (2c) folgt, daß in diesem Fall

$$I_{1R} = I_{2R} = I_{0R} \quad (3)$$

sein muß. Aus Gl. (2a) ergibt sich ferner

$$I_f = I_R = 3 I_1 = 3 I_2 = 3 I_0. \quad (4)$$

Bild 1b gibt die Verbindung der Komponentennetze wieder, die Gl. (1a) und (3) erfüllen. Im Zeigerbild 1c ist die Zerlegung des Stromes $I_R = I_f$ in seine symmetrischen Komponenten dargestellt. Setzt man die Komponenten nach Gl. (2a, b, c) wieder zusammen, dann sind die Ströme I_S und I_T , wie man sich leicht überzeugen kann, gleich Null.

Im Schrifttum werden noch die Verbindungen der Komponentennetze für den zweiphasigen Erdschluß und andere Fehler abgeleitet. In diesen Schaltungen sind jeweils die Mit-, Gegen- und Nullimpedanzen der Generatoren, Umspanner und Leitungen des Netzes einzusetzen. Die Mit- und Gegenimpedanz sind nur bei umlaufenden Maschinen verschieden; sind solche Maschinen nicht unmittelbar, sondern über Transformatoren angeschlossen, so wird man meist die Mit- und Gegenimpedanz gleichsetzen können.

Betriebsimpedanz

Im ungestörten Betrieb ist die Sternpunktbehandlung bei symmetrischer Belastung ohne Einfluß auf die Strom- und Spannungsverhältnisse; es ist gleichgültig, ob der Sternpunkt des Netzes isoliert bleibt oder ob er über eine Impedanz oder sogar unmittelbar an Erde gelegt wird. Der Sternpunkt hat als Symmetriepunkt praktisch Erdpotential. Über eine Verbindung zwischen Sternpunkt und Erde fließt somit kein Strom.

Die Impedanz, welche die normalen Betriebsströme begrenzt, nennt man die „Betriebsimpedanz“ (Z_B) oder — nach dem Verfahren der symmetrischen Komponenten — die „Mitimpedanz“ (Z_1). Sie kann in bekannter Weise so gemessen werden, daß man eine Dreiphasenspannungsquelle mit der Sternspannung U_L anlegt und den Leiterstrom I_L ermittelt (Bild 2a). Die Mitimpedanz Z_1 erhält man dann nach folgender Gleichung:

$$Z_1 = \frac{U_R}{I_R} = \frac{U_L}{I_L}. \quad (5)$$

Nullimpedanz

Im Fehlerfalle, wenn die Isolation nach Erde durchbrochen ist, ist jedoch die Art der Sternpunktbehandlung in bezug auf die Höhe der Erdschlußströme und der Spannungsbeanspruchung von ausschlaggebender Bedeutung. Die dabei entstehende Unsymmetrie der Leitererdspannungen führt zu einer Spannungsverlagerung des Sternpunktes und dadurch zu überlagerten Strömen, die in allen drei Leitern gleiche Richtung haben und somit über Erde zurückfließen müssen, — den „Nullströmen“.

Die Impedanz, die diese Nullströme begrenzt, nennt man die „Nullimpedanz“ (Z_0). Sie wird nach Bild 2b so ermittelt, daß man die drei Leiter (z. B. einer Leitung) am

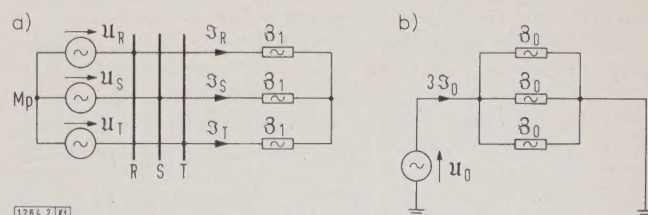


Bild 2. Prinzipschaltungen zur Messung a) der Betriebsimpedanz und b) der Nullimpedanz.

Anfang und Ende kurzschließt, zwischen einem der auf diese Weise gebildeten Sternpunkte und Erde eine Einphasenspannungsquelle mit der Spannung U_0 anlegt und den Gesamtstrom $3I_0$ mißt. Die Nullimpedanz erhält man dann, auf einen Leiter bezogen, nach folgender Gleichung:

$$Z_0 = \frac{U_0}{3I_0} \tag{6}$$

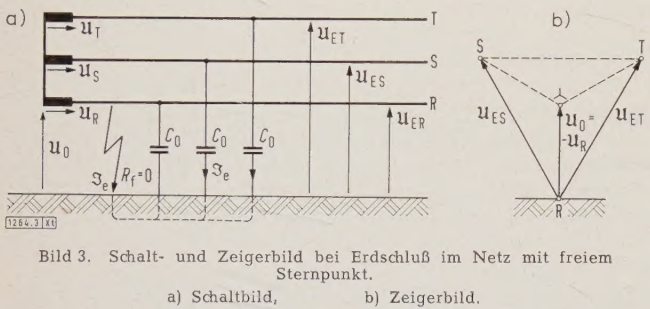
Man kann ein Drehstromnetz mit Erde als Rückleiter nach Bild 3 auch durch ein Vierleiternetz nachbilden. Man ordnet dann den drei Leitern nur die Mitimpedanz Z_1 zu und der Rückleitung über Erde die Impedanz Z_E . Mißt man in diesem Ersatznetz die Nullimpedanz nach Bild 2b, dann setzt sich die Nullspannung aus dem Spannungsfall an der Mitimpedanz Z_1 und an der Impedanz Z_E des vierten Leiters zusammen:

$$U_0 = I_0 Z_1 + 3 I_0 Z_E \tag{7}$$

Daraus ergibt sich die folgende Gleichung:

$$Z_0 = Z_1 + 3 Z_E \tag{8a}$$

In der Impedanz Z_E ist dann gegebenenfalls auch die Impedanz Z_{ME} zwischen dem Sternpunkt eines Umspanners und Erde enthalten. Außerdem ist dessen Nullimpedanz



sinngemäß bei Z_E zu berücksichtigen. Im allgemeinen wird die Impedanz Z_E nach der Gleichung

$$Z_E = \frac{1}{3} \cdot (Z_0 - Z_1) \tag{8b}$$

aus der berechneten oder gemessenen Null- und der Mitimpedanz bestimmt, wenn das Netz als Vierleiternetz dargestellt werden soll.

Nullimpedanz von Transformatoren

Bei Transformatoren ist die Nullimpedanz abhängig von der Schaltgruppe, vom Aufbau des Kerns und auch von der Größe des Nullstromes, da der von den Nullströmen erzeugte magnetische Fluß teilweise über den Kessel verläuft. Für die Erdung in Niederspannungsnetzen werden üblicherweise in Stern-Zick-Zack geschaltete Transformatoren verwendet, bei denen die Nullimpedanz nur etwa 10 % der Mitimpedanz beträgt und die Sternpunktbelastung dementsprechend hoch sein kann. Über die Größe der Nullimpedanz wichtiger Transformatortypen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen gibt Tafel 1 Auskunft.

Bei Stern-Dreieck-Transformatoren ist, wenn die Dreieckswicklung am Kern liegt, die Nullimpedanz kleiner als die Mitimpedanz. Liegt die Dreieckswicklung jedoch außen, dann sind Mit- und Nullimpedanz gleich groß.

Transformatoren in Stern-Stern-Schaltung, deren Dreieck-Ausgleichwicklung am Kern liegt und für ein Drittel der Nenndurchgangsleistung bemessen ist, haben eine Nullimpedanz, die meist größer als die Mitimpedanz ist, wenn die zu erdende Sternwicklung außen liegt. Sie ist jedoch kleiner, wenn die zu erdende Sternwicklung in der Mitte liegt. Die Nullimpedanzen von Stern-Stern-Transformatoren ohne Ausgleichwicklung sind erheblich größer als deren Mitimpedanz. Solche Transformatoren sind wegen des star-

Tafel 1. Verhältnis der Nullimpedanz zur Mitimpedanz und Kenngrößen der Transformatoren im 110-kV-Netz der Stadtwerke Hannover.

Zweiwicklungstransformatoren			Dreiwicklungstransformatoren ¹⁾			
Zeigerbild der Außen- Innenwicklung		Bereich von Z_0/Z_1	Zeigerbild der Außen- Mittel- Innenwicklung			Bereich von Z_0/Z_1
		2 ... 4 ... 10				0,8 ... 1,4 ... 2,4
		3 ... 5 ... 10				0,4 ... 0,7 ... 1,2
		0,7 ... 0,8 ... 0,9	¹⁾ Die Dreieckswicklung ist für $\frac{1}{3}$ der Nenn-Durchgangsleistung ausgelegt. Die Mitreaktanz ist auf diese Nenn-Durchgangsleistung bezogen.			
		1				

Kenngrößen der Transformatoren							
Übersetzung kV/kV	Zeigerbild der Außen-, Innen-, und Mittelwicklung	Schaltgruppe	N_n MVA	u_k %	Z_1 Ω	Z_0 Ω	Z_0/Z_1
108/10,5		Y d 5	20	19,1	111	97,5	0,88
120/10,5		Y d 5	64	11,7	26,4	22,1	0,84
113/33/10,5		Yy 0 d 5	32	12,5	50	99	2
112/118/10,5		Yy 0 d 5	80	12,9	20,1	28,6	1,42

ken, über die Kesselwandungen verlaufenden Streuflusses der Nullströme und der damit verbundenen Erwärmung für die unmittelbare Erdung des Transformatorsternpunktes nur bedingt verwendbar. Die Mit- und Nullimpedanzen einiger Transformatoren im 110-kV-Netz der Stadtwerke Hannover sind zum Vergleich mit den allgemeinen Angaben in Tafel 1 eingetragen.

Nullimpedanz von Drehstromkabeln

Bei Drehstromkabeln ist die Nullimpedanz stark abhängig vom Querschnitt, vom Aufbau des Kabels und insbesondere von der Eisenbewehrung. In Tafel 2 wurden einige Werte für 10-kV-, 30-kV- und 110-kV-Kabel für kleine und große Querschnitte zusammengestellt. Die Werte gelten für Kabel ohne Armierung und näherungsweise auch für Kabel mit Armierung bei Erdkurzschlußströmen, die so hoch sind, daß die Eisenbewehrung in Sättigung geht, jeweils jedoch für Verlegung in unbebautem Gelände.

Andernfalls, insbesondere bei Mittelspannungskabeln mit magnetisch geschlossener Eisenbandarmierung oder auch bei Verlegung in Stahlrohren, können die Nullimpedanzen bis etwa auf das 10-fache der Mitimpedanz ansteigen. Der induktive Anteil ist dann gering und nur wenig größer als die Reaktanz im Mitsystem, dagegen wird der

Tafel 2. Nullimpedanzen üblicher sowie der in Hannover verlegten Drehstromkabel.

10-kV-Gürtelkabel (Cu)		30-kV-Dreibleimantel-Massekabel (Cu)		110-kV-Einleiter-Olkabel (Cu)	
Querschnitt mm²	Nullimpedanz Ω/km	Querschnitt mm²	Nullimpedanz Ω/km	Querschnitt mm²	Nullimpedanz Ω/km
35	1,27 + j 1,76	50	1,33 + j 0,92	120	0,79 + j 0,30
150	1,13 + j 1,12	150	0,93 + j 0,62	300	0,60 + j 0,24

Kabel im 110-kV-Netz der Stadtwerke Hannover		
Art der Impedanz und Verlegungsort	Unbewehrtes Einleiter-Olkabel mit Bleimantel Kupfer-Querschnitt 185 mm²	Dreileiter-Olkabel mit Bleimantel Kupfer-Querschnitt 240 mm²
Mitimpedanz	$Z_1 = 0,18 \text{ Ω/km}$	$Z_1 = 0,16 \text{ Ω/km}$
Nullimpedanz:		
Rechenwert	$Z_0 = 0,81 \text{ Ω/km}$	$Z_0 = 0,75 \text{ Ω/km}$
Meßwert	$Z_0 = 0,61 \text{ Ω/km}$ $Z_0 = (0,6 + j 0,2) \text{ Ω/km}$	$Z_0 = 0,69 \text{ Ω/km}$
Verlegungsort	stark bebaut	schwach bebaut

Wirkwiderstand wegen des nunmehr verminderten Querschnitts der Erdrückleitung erheblich größer als bei teilweiser Rückführung der Ströme über Erde. Die Eisenarmierung mit geschlossenem magnetischem Kreis vermindert wohl die Nullreaktanz, vergrößert jedoch die Nullimpedanz.

Die Nullimpedanz ist wesentlich abhängig von der Leitfähigkeit des Erdbodens und insbesondere auch von der Verlegungsdichte benachbarter Wasserleitungen, Geleise und dergleichen. Der Einfluß der Bebauung wird durch einen weiteren Faktor, den sogenannten „Zivilisationsfaktor“, berücksichtigt. Er erreicht in unbebautem Gelände den Wert 1, kann jedoch in stark bebauten Gegenden unter 0,5 sinken. In bebauten Gegenden ist die Nullimpedanz also kleiner.

Die gemessenen Mit- und Nullimpedanzen einiger Kabel im 110-kV-Netz der Stadtwerke Hannover sind zum Vergleich in Tafel 2 eingetragen. Das gemessene Einleiter-Ölkabel führt mitten durch dichtbesiedeltes Stadtgebiet, das Dreileiter-Ölkabel ist in weniger bebautem Gebiet verlegt. Dementsprechend ist beim Einleiter-Ölkabel die gemessene Nullimpedanz gegenüber den Rechenwerten für unbebaute Gegend stärker verkleinert als beim Dreileiter-Ölkabel.

Nullimpedanz von Drehstrom-Generatoren

Bei Generatoren beträgt die Nullimpedanz meist weniger als 30 % der subtransienten Reaktanz, die den Anfangs-

Netz mit freiem oder isoliertem Sternpunkt

Im Netz mit freiem Sternpunkt wird der Strom über die Fehlerstelle im wesentlichen durch die Erdkapazität der Leiter bestimmt. Bei einem widerstandslosen Erdschluß des Leiters R nimmt dieser Erdpotential an, und der Spannungstern wird um die Nullspannung angehoben, die in diesem Falle gleich dem negativen Wert der Sternspannung U_R ist (Bild 3). Der Sternpunkt nimmt die Sternspannung gegen Erde an. Diese addiert sich geometrisch zu den Spannungen der beiden „gesunden“ Leiter S und T gegen den Sternpunkt, so daß diese Leiter insgesamt die Dreiecksspannung gegen Erde annehmen. Das Spannungsdreieck bleibt erhalten, ein Verbraucher kann also auch bei Erdschluß eines Leiters ungestört Leistung entnehmen.

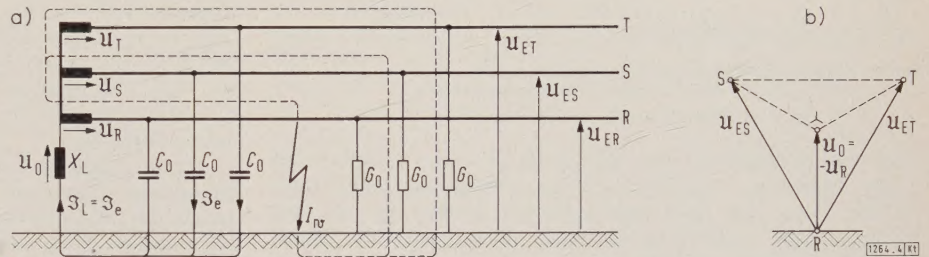
Die durch den Erdschluß hervorgerufene Unsymmetrie der Leitererdspannungen bewirkt, daß sich den normalen dreiphasigen Ladeströmen, die von den Leitern zur Erde fließen, einphasige Ströme überlagern, deren Summe nicht mehr Null ist. Der über die Fehlerstelle fließende Erdschlußstrom ergibt sich danach zu

$$I_e = 3 U_0 \omega C_0 \quad (9)$$

Er hängt also von der Erdkapazität der Leiter ab, und wächst angenähert linear mit der Ausdehnung des Netzes.

Bild 4. Schalt- und Zeigerbild bei Erdschluß im Netz mit Erdschlußlöschung.

a) Schaltbild, b) Zeigerbild.



kurzschlußstrom bestimmt. Eine unmittelbare Erdung von Generatorsternpunkten ist deshalb möglichst zu vermeiden, weil sonst der Generator durch einphasige Erdkurzschlußströme beansprucht wird, die höher sind als sein dreiphasiger Kurzschlußstrom. In den westdeutschen städtischen Kabelnetzen sind allerdings die Generatoren üblicherweise nicht galvanisch mit dem Netz verbunden, so daß der Generatorsternpunkt auch nicht für eine niederohmige Sternpunktterdung des Netzes herangezogen werden kann.

Ströme und Spannungen bei Erdschluß und Erdkurzschluß

Einfluß der Ströme und Spannungen auf den Betrieb

Jeder Erdschluß oder Erdkurzschluß bewirkt eine Unsymmetrie im Netz und hat eine Änderung der Leitererdspannungen und Ströme über Erde zur Folge. Es ergeben sich daraus zwei grundlegende Fragen:

1. Wird bei einem Fehler mit Erdberührung die Leitererdspannung erhöht, wie weit wird sie erhöht, wie lange dauert diese Erhöhung und wie breitet sie sich über das ganze Netz aus? Die Antwort hierauf gibt Hinweise auf die Beanspruchung der Isolation und der Überspannungsschutzgeräte [4].
2. Wie groß sind bei einem Fehler mit Erdberührung die über Erde fließenden Ströme und wie lange fließen sie? Aus der Antwort hierauf zieht man Rückschlüsse auf die Beanspruchung der Erdungsanlagen [5, 6], die Gefährdung von Personen und die Beeinflussung fremder Anlagen [7] (z. B. Fernmeldeleitungen).

Die Höhe und Dauer der Ströme und Spannungen bei Fehlern mit Erdberührung ist schließlich von ausschlaggebender Bedeutung für die Erfassung und Beseitigung solcher Fehler.

Die Erdkapazität von Kabeln ist etwa 30- bis 100-mal so groß wie die Erdkapazität von Freileitungen. Sie beträgt z. B. für ein 110-kV-Zwickelölkabel ($3 \times 240 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$) $0,28 \mu\text{F/km}$, dagegen bei einer 110-kV-Freileitung ($150/25 \text{ Al/St}$) $0,0047 \mu\text{F/km}$. Dieses entspricht einem kapazitiven Erdschlußstrom des 110-kV-Kabels von rd. 17 A/km (rd. 1 MVA/km Löschleistung), der 110-kV-Freileitung dagegen von nur $0,3 \text{ A/km}$.

Netz mit Erdschlußlöschung

Auch im Netz mit Erdschlußlöschung wird bei Erdschluß eines Leiters der Sternpunkt um die Nullspannung angehoben, die wiederum dem negativen Wert der Sternspannung des kranken Leiters entspricht. Die beiden gesunden Leiter nehmen auch hier die Dreiecksspannung gegen Erde an (Bild 4). Das Spannungsdreieck bleibt erhalten, ein Verbraucher kann also dem Netz auch bei Erdschluß ungestört Leistung entnehmen.

Bei der durch einen widerstandslosen Erdschluß verursachten Unsymmetrie der Leitererdspannungen fließen in einem Netz mit Erdschlußlöschung über die Erdkapazitäten der gesunden Leiter Ströme in gleicher Höhe wie im Netz mit freiem Sternpunkt. Sie kehren jedoch jetzt bei genauer Abstimmung über die Erdschlußspule zum Sternpunkt und ins Netz zurück. Das Wesen der Erdschlußlöschung mit Petersenspulen liegt also nicht darin, die überlagerten kapazitiven Nullströme zu vermeiden, sondern sie über die Erdschlußspule und nicht über den Erdschlußlichtbogen in das Netz zurückzuführen.

An der Erdschlußspule liegt die Nullspannung. Daraus resultiert die Bedingung für volle Kompensation, bei der die Spule den gesamten kapazitiven Erdschlußstrom übernimmt:

$$I_e = \frac{U_\perp}{X_L} = 3 U_0 \omega C_0, \text{ hieraus } X_L = \frac{1}{3 \omega C_0} \quad (10a)$$

Diese Bedingung kann nicht immer genau erfüllt werden, oder sie wird zur leichteren Auffindung von Isolationsfehlern absichtlich nicht genau eingehalten.

Über einen Verlustleitwert G_0 , der die Verluste durch Ableitung und Korona sowie durch die Ströme in den Erdschlußspulen und auch in den Kabeln und Leitungen berücksichtigt, fließt ein Wirkstrom, der „Restwirkstrom“ I_w , der nur über die Fehlerstelle zurückfließen kann. Man berechnet ihn ebenso wie den kapazitiven Erdschlußstrom:

$$I_w = 3 U_0 G_0. \quad (10b)$$

Bei Kabelnetzen erreicht er etwa 2 bis 5 % des kapazitiven Erdschlußstromes.

Netz mit niederohmiger Sternpunktterdung

Verbindet man den Sternpunkt unmittelbar oder mittelbar über strombegrenzende, jedoch niederohmige Impedanzen mit Erde, so fließt bei einem Fehler mit Erdberüh-

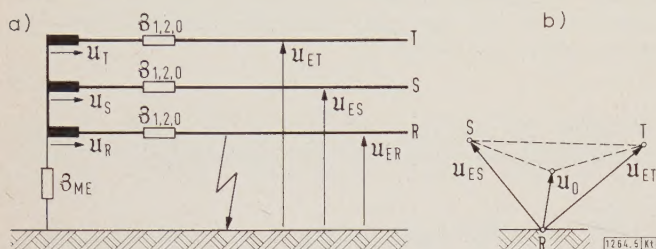


Bild 5. Schalt- und Zeigerbild bei einphasigem Erdschluß in einem Netz mit niederohmiger Sternpunktterdung.

a) Schaltbild, b) Zeigerbild.

rung ein Kurzschlußstrom über Erde (Bild 5). Dabei soll in den folgenden Ausführungen die Erdung als niederohmig gelten, wenn der Erdschlußstrom größer ist als der größtmögliche Betriebsstrom und demgemäß als Kurzschlußstrom erfaßt werden kann.

Bei einem einphasigen Erdschluß wird der Fehlerstrom — ebenso wie bei einem symmetrischen dreiphasigen Kurzschluß — von der Sternspannung des kranken Leiters getrieben. Aus dem Ersatzschaltbild Bild 1b und Gl. (4) folgt, wenn man die Kapazität der Leiter außer acht läßt, die Gleichung für den einpoligen Erdschlußstrom:

$$I_{k(1)} = \frac{3 U_{\perp}}{\beta_0 + \beta_1 + \beta_2}. \quad (11)$$

Der dreiphasige Kurzschlußstrom beträgt

$$I_{k(3)} = \frac{U_{\perp}}{\beta_1}. \quad (12)$$

Daraus ergibt sich, wenn man $\beta_2 = \beta_1$ setzt, das Verhältnis der Kurzschlußströme

$$I_{k(1)}/I_{k(3)} = \frac{3}{\beta_0/\beta_1 + 2}. \quad (13)$$

Für die Beanspruchung der Isolation interessiert noch, wie weit die Spannung der gesunden Leiter gegen Erde bei einem einphasigen Erdschluß über den Wert der normalen Leitererdspannung ansteigt. Nach der Theorie der symmetrischen Komponenten ergeben sich bei einer widerstandslosen Verbindung des Leiters R mit Erde folgende Spannungen an der Fehlerstelle:

$$U_{ER} = 0, \quad (14)$$

$$U_{ES} = \left(a^2 - \frac{\beta_0 + a^2 \beta_1 + a \beta_2}{\beta_0 + \beta_1 + \beta_2} \right) \cdot U_R, \quad (15)$$

$$U_{ET} = \left(a - \frac{\beta_0 + a \beta_1 + a^2 \beta_2}{\beta_0 + \beta_1 + \beta_2} \right) \cdot U_R. \quad (16)$$

An der Fehlerstelle tritt auch eine Nullspannung auf, sie beträgt:

$$U_0 = - \frac{\beta_0}{\beta_0 + \beta_1 + \beta_2} \cdot U_R. \quad (17)$$

Setzt man in diesen Gleichungen $\beta_2 = \beta_1$, dann ergeben sich die folgenden, auf die Sternspannungen bezogenen, Werte

$$U_{ES}/U_R = \left(a^2 - \frac{\beta_0/\beta_1 - 1}{\beta_0/\beta_1 + 2} \right), \quad (15a)$$

$$U_{ET}/U_R = \left(a - \frac{\beta_0/\beta_1 - 1}{\beta_0/\beta_1 + 2} \right), \quad (16a)$$

$$U_0/U_R = - \frac{\beta_0/\beta_1}{\beta_0/\beta_1 + 2} = - \frac{1}{1 + 2 \beta_0/\beta_1}. \quad (17a)$$

Die Leitererdspannung kann jetzt erheblich kleiner sein als die Dreiecksspannung, und die Nullspannung wird stets kleiner als die Sternspannung. Das Spannungsdreieck bleibt nicht erhalten, ein Verbraucher kann dem Netz während eines Erdschlusses nicht ungestört Leistung entnehmen.

Zusammenhang zwischen Leitererdspannung und Erdschlußstrom

Ist die Nullimpedanz nach Betrag und Winkel gleich der Mitimpedanz, was in Netzen mit vielen geerdeten Transformatorsternpunkten durchaus möglich ist, so wird der einphasige Erdschlußstrom gleich dem dreiphasigen Kurzschlußstrom. Die Spannung der gesunden Leiter gegen Erde ist in diesem Fall wie im symmetrischen Betrieb gleich der Sternspannung. Geht die Nullimpedanz gegen unendlich, so wird der einphasige Erdschlußstrom Null und die nichterdgeschlossenen Leiter nehmen die Dreiecksspannung gegen Erde an.

Im praktischen Betrieb wird in Netzen mit niederohmig geerdetem Sternpunkt die Nullimpedanz meist ein Mehrfaches der Mitimpedanz sein. Die nichterdgeschlossenen Leiter nehmen dann nicht ganz die Dreiecksspannung gegen Erde an und der einphasige Erdschlußstrom erreicht nicht die volle Höhe des dreiphasigen Kurzschlußstromes. Der Zusammenhang zwischen der auf die Dreiecksspannung bezogenen Leitererdspannung bei Erdschluß — nach VDE 0111 auch „Erdungsziffer“ genannt — und dem Verhältnis des einphasigen Erdschlußstromes zum dreiphasigen Kurzschlußstrom ist in Bild 6 dargestellt.

Nur wenn Null- und Mitimpedanz annähernd gleichen Phasenwinkel haben, wie es bei der induktiven Sternpunktterdung der Fall ist, nimmt die Erdungsziffer bei wachsendem Erdschlußstrom ab. Sie liegt bei Erdschlußströmen, die mindestens halb so groß sind wie der dreiphasige Kurzschlußstrom, unter 0,8, und es kann dann ein Netz nach VDE 0111/2. 61 als „starr geerdet“ bezeichnet

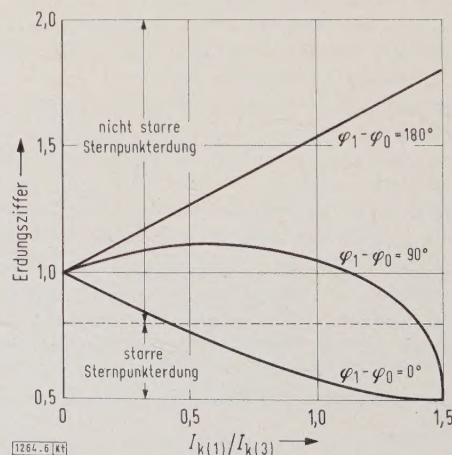


Bild 6. Abhängigkeit der Erdungsziffer vom Verhältnis des einphasigen Erdschlußstromes $I_{k(1)}$ zum dreiphasigen Kurzschlußstrom $I_{k(3)}$ (Kurzschlußverhältnis). Mit $\varphi_1 - \varphi_0$ ist die Differenz der Winkel der Mit- und Nullimpedanz bezeichnet.

werden und eine verringerte Isolation erhalten. Will man jedoch die Erdkurzschlußströme auf niedrigere Werte begrenzen, so steigt die Erdungsziffer über 0,8 an, das Netz gilt im Sinne von VDE 0111 als „nicht starr geerdet“ und muß voll isoliert werden. In beiden Fällen ist es gleichgültig, ob die Transformatorsternpunkte unmittelbar oder mittelbar über strombegrenzende Impedanzen geerdet sind. Immerhin hat man auch bei nichtstarrer Erdung noch den Vorteil, daß man in einem Netz, in dem die einphasigen Erdkurzschlußströme mindestens 25 % des dreiphasigen Kurzschlußstromes betragen, im Erdschlußfalle wenig mehr als 80 % der Dreiecksspannung zwischen Leiter und Erde erreicht.

Schließt die Nullimpedanz gegenüber der Mitimpedanz einen Phasenwinkel von 90° ein, wie dies annähernd bei der ohmschen Sternpunkterdung der Fall sein kann, so ist im Falle eines Erdkurzschlusses mit einer Spannungserhöhung der gesunden Leiter auf die Dreiecksspannung und möglicherweise sogar darüber hinaus zu rechnen, solange der einphasige Erdkurzschlußstrom kleiner gehalten wird als der dreiphasige Kurzschlußstrom. Wenn auch im allgemeinen der Winkel zwischen Null- und Mitimpedanz kleiner als 90° ist, so bringt doch die Erdung über ohmsche Widerstände praktisch keine Verminderung der Spannungsbeanspruchung der Leitererdisolations bei Erdkurzschluß.

Schließt die Nullimpedanz gegenüber der Mitimpedanz einen Winkel von 180° ein, wie dies annähernd in Netzen mit freiem Sternpunkt der Fall sein kann, so darf der kapazitive Erdschlußstrom nur wenige Prozent des dreiphasigen Kurzschlußstromes betragen, wenn man nicht riskieren will, daß bei Erdschluß die Spannung der gesunden Leiter erheblich über die Dreiecksspannung hinaus ansteigt [8]. Die kapazitiven Erdschlußströme fließen über die Induktivitäten der Transformatoren, Leitungen, Kabel usw. zum Fehlerort und dann über die Erdkapazitäten in das Netz zurück. In sehr ausgedehnten Netzen oder auch in Kabelnetzen mit Kurzschluß-Begrenzungsdröseln kann die Eigenfrequenz dieses aus Längsinduktivität und Eigenkapazität gebildeten Reihenschwingkreises in die Größenordnung der Betriebsfrequenz kommen. Durch Resonanz wird dann die Sternpunkt-Erdspannung (Nullspannung) über die Sternspannung und die Leitererdspannung über die Dreiecksspannung hinaus erheblich angehoben.

In Netzen mit freiem Sternpunkt und mit Erdschlußlöschung ist im allgemeinen der Strom über die Fehlerstelle sehr klein gegenüber dem dreiphasigen Kurzschlußstrom. In Netzen mit niederohmiger Sternpunkterdung erreichen die Ströme bei Erdkurzschlüssen die Größenordnung des dreiphasigen Kurzschlußstromes. Solche Netze gelten dann nach VDE 0141/11.58 als mittelbar bzw. unmittelbar geerdet. Eine Gegenüberstellung dieser beiden Vorschriften VDE 0141 und VDE 0111 zeigt deutlich, daß nach VDE 0111 eine Unterteilung der Netze nach der Spannungsbeanspruchung, in VDE 0141 dagegen eine Unterteilung der Netze nach der Strombeanspruchung getroffen wurde. Ein Widerspruch zwischen diesen beiden Vorschriften besteht somit nicht, jedoch leider auch keine Übereinstimmung der Begriffe.

Begriffsbestimmungen, Leitsätze und Vorschriften

Die verschiedenartigen Ströme und Spannungen bei Fehlern mit Erdberührung in Drehstromnetzen bedingen eine Unterteilung der Netze in verschiedene Gruppen.

Art der Sternpunktbehandlung unter dem Gesichtspunkt der Isolationsbemessung

In Deutschland unterteilt man hinsichtlich der Spannungsbeanspruchung die Netze in solche mit

- freiem Sternpunkt,
- Erdschlußlöschung,
- halbstarrer Sternpunkterdung,
- starrer Sternpunkterdung,

wobei man die beiden letzten Gruppen gern auch als „niederohmige Sternpunkterdung“ bezeichnet. Die „Leit-

sätze für die Bemessung und Prüfung der Isolation elektrischer Anlagen für Wechselspannungen von 1 kV und darüber“ (VDE 0111/2.61) unterscheiden in § 6 nach der Spannungsbeanspruchung der Leiterisolation zwischen

„Netzen mit starrer Sternpunkterdung, wenn die Erdungsziffer an keiner Stelle des Netzes den Wert 0,8 überschreitet“ und

„Netzen mit nicht starrer Sternpunkterdung, wenn die Erdungsziffer an einer beliebigen Stelle des Netzes den Wert 0,8 überschreitet.“

Betriebsmittel für Anlagen mit starr geerdetem Sternpunkt können nach § 11 mit verringerter Isolation ausgeführt werden.

Da vielfach der Begriff „starre Erdung“ mit der direkten, d. h. unmittelbaren Verbindung eines oder mehrerer Transformatorsternpunkte mit Erde ohne Zwischenschaltung von strombegrenzenden — nieder- oder hochohmigen — Impedanzen identifiziert wird, ohne damit eine Begrenzung der Erdungsziffer auf den Wert 0,8 zu verbinden, ist von verschiedenen Seiten für die „starre Erdung“ gemäß VDE 0111, § 6, der Begriff „wirksame Erdung“ vorgeschlagen worden. Die Bezeichnung der „Wirksamkeit“ einer Erdung — in der IEC (International Electrotechnical Commission) nennt man es „effectively earthed“ — drückt offenbar besser als das Wort „starre Erdung“ aus, daß eine Erdung derart wirksam ist, daß die Erdungsziffer, nämlich das Verhältnis der Leitererdspannung zur Dreiecksspannung, den Wert 0,8 nicht überschreitet. Dabei ist zu beachten, daß man ein Netz sehr wohl unmittelbar ohne Zwischenschaltung besonderer Impedanzen erden kann, ohne eine wirksame oder starre Erdung im Sinne der Leitsätze VDE 0111, § 6, zu erreichen. Netze, in denen die Erdungsziffer größer als 0,8 bleibt, in denen also die Erdkurzschlußströme auf kleinere Werte begrenzt werden, würde man analog als „nicht-wirksam geerdet“ bezeichnen. In ihnen kann die Erdung durchaus ebenfalls unmittelbar oder über niederohmige Impedanzen vorgenommen werden, ohne daß jedoch das Kriterium der Wirksamkeit bezüglich der Einhaltung des Wertes 0,8 für die Erdungsziffer erfüllt wird. Solche Netze müssen, wie schon gesagt wurde, voll isoliert werden.

Wie oben gesagt, wendet die IEC (Publication 71) für starr geerdete Netze den weniger mißverständlichen Begriff „effectively earthed“ an und sagt außerdem noch in Anlehnung an die amerikanischen Vorschriften aus, daß die Erdungsziffer kleiner als 0,8 bleibt, wenn das Verhältnis Nullreaktanz zu Mitreaktanz kleiner als 3 und das Verhältnis Nullwiderstand zu Mitwiderstand kleiner als 1 ist. Netze mit einer Erdungsziffer größer als 0,8 werden als „non-effectively earthed“ bezeichnet.

AIEE-Standard Nr. 32 (American Institute of Electrical Engineers)¹⁾ benutzt im Prinzip die gleiche Unterteilung wie die IEC-Publication 71. Im Unterschied zu dieser wird jedoch bei AIEE-Standard die Erdungsziffer 0,8 nicht genannt. Hier gelten die Netze als „effectively grounded“, wenn die obengenannten Verhältnisse $X_0/X_1 = 3$ bzw. $R_0/R_1 = 1$ nicht überschritten werden. Eine völlige Übereinstimmung zwischen AIEE und IEC ist somit nicht zu verzeichnen, da die Erdungsziffer 0,8 auch bei einem Verhältnis zwischen Null- und Mitimpedanz im Bereiche von 3 bis 4 nicht überschritten wird, solange der Winkel zwischen Null- und Mitimpedanz nicht mehr als etwa 25° beträgt. Dieser Bereich kommt insbesondere bei Höchstspannungs-Freileitungssystemen in Betracht, während bei Kabelnetzen die obere Grenze etwa bei dem Wert 3,5 liegt.

Als wesentlich ist jedoch hervorzuheben, daß die AIEE-Norm den Begriff „effectively grounded“ auch für Teile eines galvanisch verbundenen Netzes zuläßt, was in VDE 0111 — hier „starr geerdet“ genannt — bisher leider noch nicht der Fall ist. Es können also nach AIEE-Standard Netzteile, in denen die Bedingungen der wirksamen Erdung erfüllt sind, mit verringerter Isolation ausgeführt werden, während andere, mit diesen galvanisch verbundene

1) Standard for Neutral Grounding Devices, 15. Mai 1947

Netzteile, in denen die Bedingung der wirksamen Erdung nicht erfüllt ist, mit voller Isolation ausgeführt werden müssen.

Ebensowenig wie die unmittelbare Verbindung von Transformatorsternpunkten mit Erde in einem Netz die Einhaltung der Bedingung der wirksamen Sternpunkterdung garantiert, bedeutet die Erdung der Sternpunkte über Widerstände oder insbesondere Induktivitäten, daß das Netz nun unbedingt als „nichtwirksam geerdet“ gelten müsse. Die Zugehörigkeit eines Netzes zur Gruppe der „wirksam geerdeten“ bzw. „nichtwirksam geerdeten“ Netze wird nicht durch die Art der Verbindung zwischen Sternpunkt und Erde entschieden, sondern einzig und allein durch die erzielte Wirkung bezüglich der Höhe der Leitererdspannung bei Erdkurzschluß und damit letzten Endes durch das Verhältnis und den Winkel zwischen Null- und Mitimpedanz.

Art der Sternpunktbehandlung unter dem Gesichtspunkt der Bemessung der Erdungsanlagen

Man kann die Sternpunkte der Transformatoren isoliert lassen, man kann sie auch mittelbar über Erdschlußspulen, über ohmsche Widerstände, über Reaktanzen oder unmittelbar erden. Dementsprechend wird in AIEE-Standard-Nr. 32 wie folgt unterschieden:

- nicht geerdet (ungrounded),
- abgestimmt induktiv geerdet — Erdschlußlöschung (resonant grounded),
- Widerstandserdung (resistance grounded),
- Reaktanzerdung (reactance grounded),
- starre Erdung (solidly grounded).

Eine ähnliche Unterteilung wird in den „Vorschriften für Erdungen in Wechselstromanlagen für Nennspannungen von 1 kV und darüber“ (VDE 0141/11.58) durchgeführt. Man unterteilt dort die Netze nach dem bei Erdschluß über die Fehlerstelle fließenden Strom. Dieser ist:

- in Netzen mit isoliertem Sternpunkt der kapazitive Erdschlußstrom,
- in Netzen mit Erdschlußlöschung der Erdschlußreststrom,
- in Netzen mit unmittelbar oder über strombegrenzte Widerstände (mittelbar) geerdetem Sternpunkt der Erdkurzschlußstrom.

In VDE 0141 wird also danach unterteilt, ob bei Fehlern mit Erdberührung hohe Ströme über Erde fließen können oder nicht.

Amerikanische Ansichten zur niederohmigen Sternpunkt- erdung

Reaktanzerdung

Nach amerikanischen Untersuchungen im Netz und an Modellen [9, 10] soll mit Rücksicht auf die Spannungsbeanspruchung in einem induktiv geerdeten Netz der einphasige Erdkurzschlußstrom wenigstens 25 % des dreiphasigen Kurzschlußstromes betragen. Dem entspricht das Verhältnis Nullimpedanz : Mitimpedanz ≈ 10 , bei welchem wiederum die Leitererdspannung im Falle eines Erdkurzschlusses auf nicht mehr als 90 % der Dreieckspannung ansteigt. Sowohl die betriebsfrequente Leitererdspannung als auch die kurzzeitigen Erdschlußüberspannungen und vor allem auch die Schaltüberspannungen sind dann wesentlich niedriger als in Netzen mit freiem Sternpunkt oder Erdschlußlöschung.

Der einphasige Erdkurzschlußstrom kann nach amerikanischer Auffassung auch kleiner sein als 25 % des dreiphasigen Kurzschlußstromes, wenn der Ladestrom des Netzes mehr als 0,5 % des dreiphasigen Kurzschlußstromes beträgt. Man gelangt dann, und dies trifft insbesondere für ausgedehnte Kabelnetze zu, allmählich in den Bereich starker Überkompensation mit niedrigen Einschwingfrequenzen beim Ausschalten einphasiger Erdkurzschlußströme. Auch dann besteht praktisch keine Gefahr erhöhter Schaltüberspannungen. Diese nach amerikanischer Ansicht bei Reak-

tanzerdung einzuhaltenden Grenzen sollen gewährleisten, daß das Niveau der inneren Überspannungen bei Reaktanzerdung wesentlich niedriger ist als in Netzen mit Erdschlußlöschung oder freiem Sternpunkt. Werden moderne Schalter mit geringer Neigung zu Rückzündungen und Überspannungen sowie Überspannungsableiter mit hohem Ableitvermögen bei inneren Überspannungen verwendet, so wird man wahrscheinlich die angegebenen Bereiche auch überschreiten können.

Eine Abstimmung des Nullsystems auf die dritte Harmonische, insbesondere durch Einbau von Drosselspulen zwischen Generator- oder auch Transformatorsternpunkten und Erde ist möglichst zu vermeiden, da sonst durch Reihenresonanz in dem aus Erdkapazität und Nullreaktanzen gebildeten Schwingkreis mit dem Generator bzw. Transformator als Oberschwingungserzeuger die dritte Harmonische im Netz stark angehoben werden kann.

Widerstandserdung

Die auf diese Weise von der induktiven Sternpunkterdung ausgeschlossenen Bereiche mit kleinen Erdkurzschlußströmen bleiben der Erdung über ohmsche Widerstände vorbehalten. Hier wird zwar die betriebsfrequente Leitererdspannung im Erdschlußfall die Dreieckspannung erreichen oder sogar überschreiten, doch werden die Erdschlußüberspannungen auf ein Mindestmaß gedämpft, solange der einphasige Erdkurzschlußstrom größer als der kapazitive Erdschlußstrom des Netzes ist. In den USA werden deshalb gerne die Generatorsternpunkte zur Schonung der Wicklungen über ohmsche Widerstände geerdet. Die einphasigen Erdkurzschlußströme werden aus wirtschaftlichen Gründen auf meist weniger als 25 % des dreiphasigen Kurzschlußstromes begrenzt, da sonst die Widerstände zu umfangreich würden. Der Anwendungsbereich der Widerstandserdung beschränkt sich aus ebenfalls wirtschaftlichen Gründen im allgemeinen auf Spannungen bis 20 kV.

Art der Sternpunktbehandlung unter dem Gesichtspunkt der Beeinflussung von Fernmeldeleitungen

Fließen bei einem Erdkurzschluß Ströme über Erde zurück, so können z. B. benachbarte Fernmeldeleitungen durch Induktionswirkung beeinflusst werden [11]. Die Frage der Beeinflussung von Fernmeldeleitungen durch Erdkurzschluß oder Doppelerdschluß von Hochspannungsleitungen wird u. a. in der „Technischen Empfehlung Nr. 1 der Schiedsstelle für Beeinflussungsfragen der Deutschen Bundesbahn, der Deutschen Bundespost und der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke“ behandelt [12].

Nach dieser Empfehlung sind Doppelerdschlüsse in gelöschten Netzen dann als mögliche Ursache einer Gefährdung zu berücksichtigen, wenn der Reststrom mehr als 1 A je 1 kV beträgt. Dieser Wert ist wohl auf die von Roser [13] und von Mangoldt [14] angegebenen Kurven des zulässigen Reststromes in Abhängigkeit von der Betriebsspannung bei Anwendung der Erdschlußlöschung in Hochspannungsnetzen zurückzuführen. Liegen die Wirk-Restströme unterhalb dieser Grenze, so ist in den meisten Fällen mit einer sicheren Löschung der Lichtbogenerdschlüsse auf Freileitungen zu rechnen, während bei Werten oberhalb dieser Grenze der Lichtbogen länger oder dauernd bestehen bleibt. Damit wird die Gefahr einer Ausweitung zum Doppelerdschluß erheblich vergrößert.

Die Praxis zeigt indessen, daß gerade in Kabelnetzen wegen des geringeren Wirk-Reststromanteiles von nur etwa 2 bis 5 %²⁾ gegenüber 3 bis 10 % in Freileitungsnetzen die Lösbedingungen für Lichtbogenerdschlüsse besonders günstig sind. Die Spannung kehrt an der Fehlerstelle nach Erlöschen des Erdschlußlichtbogens um so langsamer wieder, je geringer das Verhältnis des Wirk-Reststromes zum kapazitiven Erdschlußstrom ist. Die Grenze für die Erdschlußlöschung liegt deswegen oft — und gerade auch bei Mittelspannungs-Kabelnetzen — wesentlich höher als 1 A je 1 kV.

²⁾ Im 30-kV-Netz Hannovers wurden durch Messungen etwa 2,5 % ermittelt.

Es wäre deshalb physikalisch durchaus sinnvoll, diesen Wert auf 1,2 bis 1,5 A/kV heraufzusetzen, worüber ja auch bereits diskutiert wird³⁾.

Mittelspannungsnetze werden, zumindest in Deutschland, nicht unmittelbar geerdet, sondern vielmehr meist mittelbar über strombegrenzende Impedanzen und nicht wirksam im Sinne der IEC-Publication 71. Die einphasigen Erdkurzschlußströme bei nichtwirksamer Sternpunktterdung betragen aber nur wenige Prozent — im 10-kV-Kabelnetz der Stadtwerke Hannover 7 % — des dreiphasigen Kurzschlußstromes und werden überdies in Kabelnetzen mit eisenbandbewehrten Kabeln vorwiegend über den Kabelmantel zurückgeführt. Die Beeinflussung von Fernmeldeleitungen durch einen Erdkurzschluß braucht infolgedessen hier nicht berücksichtigt zu werden. In Netzen mit niederohmiger Sternpunktterdung wird jeder Erdkurzschluß sofort abgeschaltet. Wegen der deshalb nur sehr kurzzeitigen Spannungserhöhung an den nicht gesunden Leitern sind Doppelerdschlüsse praktisch ausgeschlossen.

Ähnlich wie bei dem in Stern-Stern geschalteten Transformator die Dreiecksausgleichwicklung eine Entkopplung der beiden Sternwicklungen im Nullsystem bewirkt, hat die ganze oder teilweise Rückführung der Nullströme über den metallischen Mantel des Kabels bekanntlich eine mehr oder minder stark reduzierende Wirkung auf die Beeinflussungsspannung. Der „Reduktionsfaktor“

$$r = \frac{\text{Fehlerstrom über Erde}}{\text{Gesamtfehlerstrom}}$$

in dem diese reduzierende Wirkung ihren Ausdruck findet, und der besagt, auf welchen Bruchteil des Gesamtfehlerstromes die über Erde zurückfließenden Ströme vermindert werden, ist naturgemäß um so kleiner, je größer die Leitfähigkeit des Kabelmantels ist und je mehr die Eisenbewehrung das magnetische Feld auf den engen Raum im Kabel selbst eingrenzt. Während bei Kabeln mit Kunststoffmantel der Reduktionsfaktor über 0,9 liegt, erreicht man bei Kabeln mit Bleimantel Reduktionsfaktoren bis etwa 0,3, bei Bewehrung mit Spezialstahl sogar um 0,2. Ein Aluminiummantel vermindert schließlich den Reduktionsfaktor unter 0,1. Durch Verlegung in Stahlrohren können Reduktionsfaktoren um 0,01 erzielt werden [15, 16]. Bei allen diesen Werten handelt es sich um Optimalwerte, die bei stärkerer oder schwächerer Sättigung der Bewehrung nicht erreicht werden.

Beeinflussungsmessungen bei den Stadtwerken Hannover ergaben folgende, auf 5 kA Erdkurzschlußstrom umgerechnete Werte: Gemessen wurden eine rd. 5 km lange 110-kV-Einleiter-Ölkabelstrecke (3 × 1 × 185 mm² Cu) mit Bleimantel gegen ein vieladriges Fernmeldekabel und ein rd. 7 km langes 110-kV-Zwickelölkabel (3 × 240 mm² Cu) mit Bleimantel, ebenfalls gegen ein vieladriges Fernmeldekabel. Im ersten Fall ergab sich auf Grund der Messung eine induzierte Spannung von 370 V gegenüber einer theoretisch ermittelten induzierten Spannung von 455 V, im zweiten Fall 230 V gegenüber 405 V.

Die theoretisch ermittelte induzierte Spannung wurde an Hand der vorgenannten „Technischen Empfehlungen Nr. 1“ berechnet, dabei wurde der allgemeine Reduktionsfaktor mit 0,5 in die Rechnung eingesetzt. Dieser Wert ist also, wie die Praxis zeigt, noch zu groß angenommen worden.

Verschiedene Arten der Sternpunktbehandlung in der Praxis

Umfrage bei Energieversorgungs-Unternehmen über die Art der Sternpunktbehandlung

Um ein Bild über die Praxis der Sternpunktbehandlung in Westdeutschland zu erhalten, wurde eine Umfrage bei

einer Reihe namhafter großstädtischer Elektrizitätsversorgungsunternehmen mit Kabelnetzen durchgeführt über die Art der Sternpunktbehandlung, die Netzlängen und die Kabelanteile in diesen Netzen. Die Beteiligung der Elektrizitätsversorgungsunternehmen war erfreulich groß.

Es beteiligten sich an dieser Umfrage 22 Elektrizitätsversorgungsunternehmen, die städtische Netze mit insgesamt 22 400 km Kabel und 1800 km Freileitung bei Spannungen von 4 bis 110 kV betreiben oder in Bau haben. Eine Aufschlüsselung nach den einzelnen Arten der Sternpunktbehandlung zeigt Bild 7. Wie zu erwarten war, überwiegt die Erdschlußlöschung mit etwa 50 % der betrachteten Netzlänge gegenüber dem freien Sternpunkt mit etwa 35 % und der niederohmigen Sternpunktterdung mit etwa 8 %. Der Rest von etwa 7 % ist teilweise kompensiert.

Von den 110-kV-Netzen mit insgesamt 1232 km Netzlänge sind 1022 km ± 83 % mit weit überwiegendem Freileitungsanteil gelöscht, wovon 785 km mit einem gelöschten Netz galvanisch verbunden sind oder waren. Von den ge-

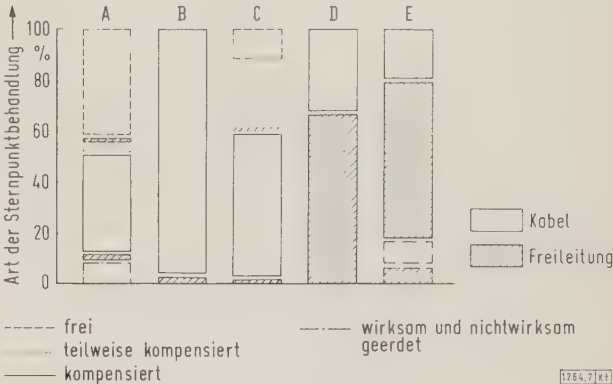


Bild 7. Prozentualer Anteil verschiedener Arten der Sternpunktbehandlung in 22 städtischen Kabelnetzen Westdeutschlands.

Block	Betriebsspannung kV	Kabellänge km	Freileitungslänge km	Netzlänge km
A	4 bis 10	17918	618	18536
B	15 bis 20	842	27	869
C	25 bis 30	3185	122	8307
D	50 bis 60	92	188	280
E	110	374	858	1232

löschten 110-kV-Netzen hatte ein Anteil mit 237 km eine freie Wahl der Sternpunktbehandlung; 17 % der 1232 km Netzlänge — 210 km — „werden wirksam oder nichtwirksam, jedenfalls niederohmig geerdet betrieben.“

Bei den Spannungsebenen 50 bis 60 kV und 15 bis 20 kV ist ausschließlich Erdschlußlöschung vorhanden, während in der Spannungsebene 25 bis 30 kV 87 % der Netze mit Erdkurzschlußkompensation oder Teilkompensation und 13 % der Netze mit freiem Sternpunkt betrieben werden. In den Spannungsebenen 4 bis 10 kV werden rd. 44 % der Netze mit freiem Sternpunkt, rd. 47 % mit Erdschlußlöschung und rd. 9 % mit wirksamer oder mit nichtwirksamer Erdung, und zwar niederohmiger Reaktanzerdung betrieben. In den Bereich der Netze mit Spannungen bis 10 kV gehören auch viele Industrienetze, die meist mit freiem Sternpunkt betrieben werden. Diese werden hier nicht behandelt.

Als Gründe für die eingeführte Art der Sternpunktbehandlung oder deren Beibehaltung wurden angegeben: Der Betrieb mit freiem Sternpunkt ist meist auf die geschichtliche Entwicklung zurückzuführen. Entweder sind die betreffenden Netze noch nicht so groß, daß der kapazitive Erdschlußstrom rasch zum Kurzschluß mit erheblichen Zerstörungen am Kabel führt, oder man hat noch keine schlechten Erfahrungen mit intermittierenden Erdschlüssen gemacht. Vielfach wurden auch größere kompensierte Netze bei Überlagerung einer höheren Spannung aufgetrennt, wobei die vorhandenen Spulen dann nicht mehr für alle

3) „Leitsätze für Maßnahmen an Fernmelde- und an Drehstromanlagen im Hinblick auf gegenseitige Näherungen“ VDE 0228/... 61 (Vorentwurf B Mai 1951). Ferner „Leitsätze für Maßnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstrombahnen“ VDE 0227/1. 59.

Teilnetze ausreichen. Erdschlußspulen sind bei Betrieb mit freiem Sternpunkt nicht erforderlich, was wirtschaftlich Vorteile bringen kann.

Da die Erdschlußlöschung vorherrscht, liegen hier auch die meisten Stellungnahmen vor. Folgende wesentliche Argumente für die Erdschlußlöschung in der Reihenfolge ihrer Häufigkeit wurden vorgebracht: erstens Weiterführung des Betriebes unter Erdschluß (vorwiegend bei den unteren Spannungen) bis zur Auffindung und gewollten Abschaltung des Fehlers, zweitens Verbundbetrieb mit einem bereits vorhandenen gelöschten Netz, drittens Beruhigung des Netzbetriebes durch Vermeidung kapazitiver Erdschlußlichtbögen, ferner kleinere Zerstörungen an der Fehlerstelle, einfacher und billiger zweipoliger Schutz, geringerer Aufwand für die Erdung sowie geringe Gefahr einer Beeinflussung von Steuer- und Fernmeldekabeln.

Die charakteristische Eigenschaft des Netzes mit Erdschlußlöschung, nämlich die selbsttätige Löschung des Erdschlußlichtbogens, wurde jedoch kaum erwähnt. Dies ist typisch für Kabelnetze, in denen diese Eigenschaft weitgehend in den Hintergrund tritt. Ein Teil der befragten Unternehmen führte als Grund für die Einführung der Erdschlußlöschung die bisher in Deutschland übliche Praxis an.

Als Gründe für die Einführung der wirksamen oder nichtwirksamen Sternpunktterdung wurden angeführt [17]: erstens Einsparung der Kompensationseinrichtung — ein Argument, das bei 110-kV-Netzen im Vordergrund stand —, zweitens selektives Abschalten der gestörten Leitung innerhalb kurzer Zeit durch den Netzschutz, der vom Erdkurzschlußstrom angeregt wird; ferner durchaus tragbarer Aufwand für den Ausbau der Erdungsanlagen in Kabelnetzen, geringere Spannungsbeanspruchung als in Netzen mit freiem Sternpunkt oder Erdschlußlöschung.

Umfrage bei Elektrizitätsversorgungsunternehmen über die Fehlerhäufigkeit

Eine weitere Umfrage befaßte sich mit der Häufigkeit von selbstlöschenden Erdschlüssen, stehenden Erdschlüssen, Kurzschlüssen (1 Fehlerort) und Doppelerdschlüssen (2 Fehlerorte) in städtischen Kabelnetzen mit Betriebsspannungen zwischen 5 und 30 kV. Zunächst ist zum Vergleich mit den Ergebnissen aus der Umfrage für städtische Kabelnetze im Mittelspannungsbereich ein Auszug aus der Fehlerstatistik der 110-kV-Freileitungsnetze des RWE, vorgetragen auf der Tagung der Studiengesellschaft im Jahre 1957 in Hamburg (Technischer Bericht Nr. 181 der Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen) in Bild 8a eingetragen. Wie in einem gut kompensierten Freileitungsnetz zu erwarten ist, überwiegen die selbstlöschenden Erdschlüsse bei weitem, doch führt die verhältnismäßig geringe Isolationsreserve eines 110-kV-Netzes zuweilen auch zu Doppelerdschlüssen.

Die Angaben aus 13 gelöschten Netzen mit insgesamt 5038 km Systemlänge, davon rd. 4 % Freileitung, ergaben eine Fehlerhäufigkeit von 7,3 Fehlern je 100 km und Jahr (entsprechend 100 %) und eine Aufteilung gemäß Bild 8b. Die Angaben aus 10 Netzen mit freiem Sternpunkt und insgesamt 10 700 km Systemlänge, davon 0,4 % Freileitungen, ergaben eine Fehlerhäufigkeit von 1,8 Fehlern je 100 km und Jahr (entsprechend 100 %) und eine Aufteilung gemäß Bild 8c. Die Mehrzahl der Netze wurde als Strahlennetz oder zumindest als gemischtes Netz bezeichnet. Die Angaben für die einzelnen Netze waren sehr verschieden. Insbesondere ergaben sich dort hohe Fehlerhäufigkeiten, wo Erdschlußwischer sicher erfaßt oder sogar gezählt wurden, was leider nicht in allen Netzen der Fall war. Angaben, bei denen auf eine Störung viele Erdschlußwischer entfielen, wurden deshalb nicht berücksichtigt.

Die Fehlerhäufigkeit in den gelöschten Netzen war im Mittel erheblich höher als in den Netzen mit freiem Sternpunkt, zu denen auch die Netze mit starker Fehlkomensation gezählt wurden. An sich ist die Fehlerhäufigkeit weniger von der Art der Sternpunktbehandlung abhängig als der Verlauf der Störung. Es ist deshalb der Unterschied

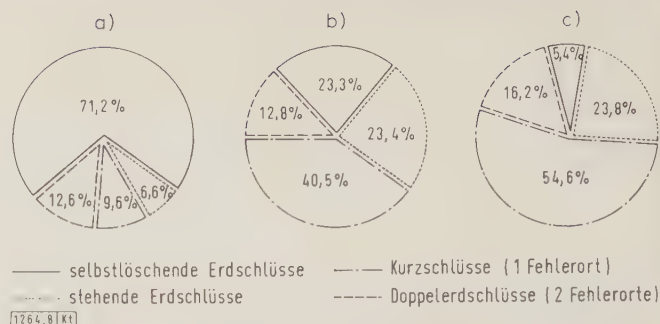


Bild 8. Prozentualer Anteil der Erdschlüsse und Kurzschlüsse in Freileitungs- und Kabelnetzen.

a) gelöschtes 110-kV-Freileitungsnetz, nach Kalasz, 1,9 Fehler je 100 km und Jahr,
b) gelöschte Kabelnetze (5 bis 30 kV), 7,3 Fehler je 100 km und Jahr,
c) isolierte Kabelnetze (5 bis 30 kV), 1,8 Fehler je 100 km und Jahr.

in der Fehlerhäufigkeit wahrscheinlich auf den in den gelöschten Netzen rd. 10-mal größeren Freileitungsanteil als in den ungelöschten Netzen zurückzuführen, da in den Kabeln selbst die wenigsten Fehler entstehen. Dies geht aus den Angaben für einige reine Kabelnetze hervor, in denen die Fehlerhäufigkeit zum Teil erheblich niedriger lag. Insgesamt zeigt sich jedoch, daß im städtischen Kabelnetz der selbstlöschende Erdschluß nur von begrenzter Bedeutung ist. Der Vorteil der Erdschlußlöschung liegt vielmehr darin, daß unter Erdschluß das Netz weiter betrieben werden kann, bis schließlich bei schwächerer Belastung der Fehler gesucht und abgeschaltet werden kann. Außerdem sind die Auswirkungen an der Fehlerstelle geringer.

Über die Dauer der Erdschlüsse wurden sehr verschiedene Angaben gemacht. Während in einigen 30-kV-Netzen die eingebauten Geräte teilweise eine rasche Fehlerortung erlauben und die Erdschlußdauer dementsprechend dort unter 2 s liegt, werden jedoch auch Werte aus 30-kV-Netzen bis mehr als eine halbe Stunde genannt. Bei 10-kV-Netzen wurden Zeiten bis über 4 h, bei 110-kV-Netzen immerhin noch Zeiten von 9 min genannt.

Betriebserfahrungen in den Netzen der Stadtwerke Hannover

In den Netzen der Stadtwerke Hannover wurden im Zuge der Entwicklung folgende Arten der Sternpunktbehandlung eingeführt (Bild 9). Das 110-kV-Netz wird mit unmittelbar geerdeten Transformatorsternpunkten z. Z. noch wirksam geerdet betrieben. Mit wachsender Kurzschlußleistung wird allmählich auf nichtwirksame Erdung übergegangen werden. Das 30-kV-Netz ist gelöscht, jedoch werden nur etwa 70 % des kapazitiven Erdschlußstromes kompensiert. Dieser durch Änderungen im 30-kV-Netz hervorgerufene Zustand wird

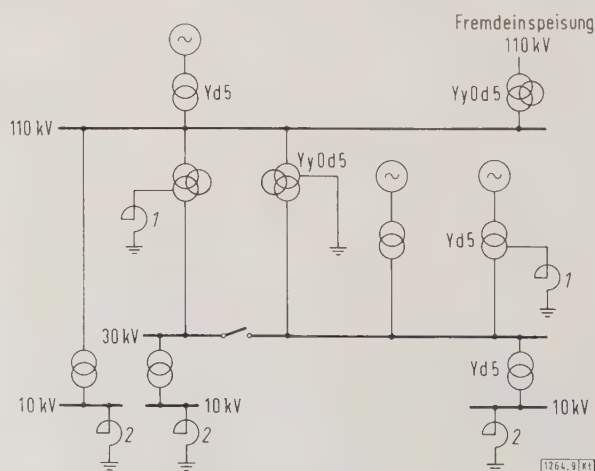


Bild 9. Grundschriftbild des 110/30/10-kV-Netzes der Stadtwerke Hannover.

1 Löschspulen 2 Sternpunktbildner als Drosselspulen

nach Wiedereinschalten der dritten Löschspule beendet sein. Das 10-kV-Netz ist nichtwirksam über Sternpunktbildner geerdet. Das 5-kV-Netz (im Bild nicht mehr eingezeichnet) wird mit freiem Sternpunkt bis zur völligen Umstellung auf 10 kV betrieben. Den räumlichen Aufbau der Netze zeigt Bild 10.

110-kV-Netz

Das 110-kV-Netz der Stadtwerke Hannover wurde erstmalig am 27. Oktober 1957 mit unmittelbarer Sternpunktterdung in Betrieb genommen und hat inzwischen eine Ausdehnung von nahezu 25 km Kabel (Systemlänge) erreicht; weitere 11 km wurden bestellt. Mit Rücksicht auf die mit weiterem Ausbau des Kabelnetzes zu erwartenden kapazitiven Erdschlußströme, für welche das 110-kV-Landesnetz die Löschung ohnehin nicht mehr übernehmen konnte,

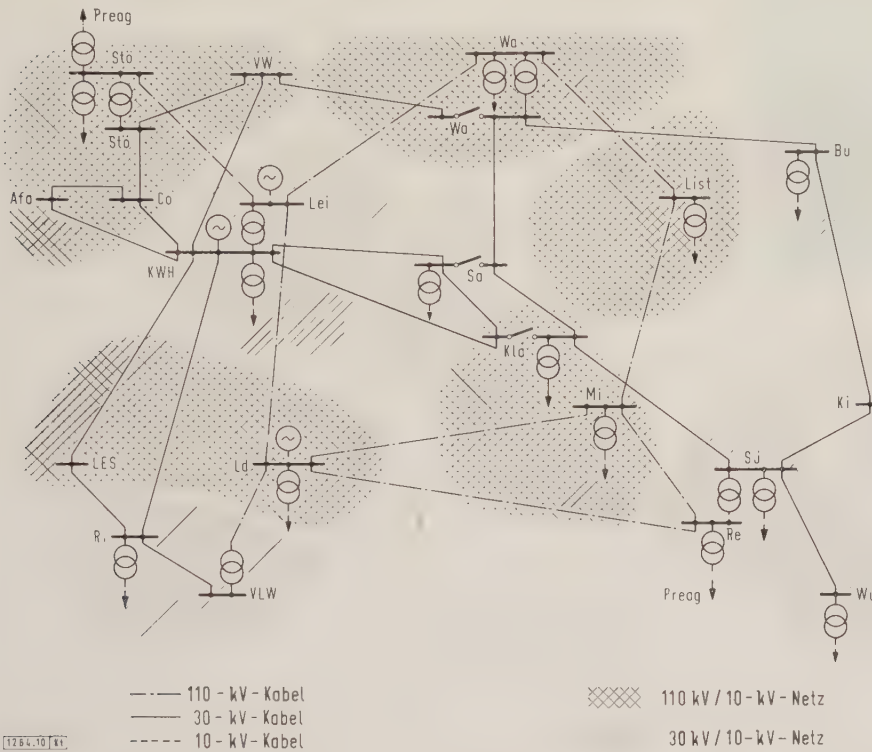


Bild 10. Plan des 110 kV/30 kV/10 kV-Kabelnetzes der Stadtwerke Hannover, Ausbauzustand 1963/1965.

wurde das Netz galvanisch durch einen Isoliertransformator (112 kV/118 kV) vom Landesnetz getrennt. Damit ergaben sich gleichzeitig die Vorteile einer Begrenzung der Kurzschlußleistung und der Regelbarkeit der Spannung. Eine lose Kupplung ohne Isoliertransformator, die im Erdschlußfalle die Netze automatisch trennt, konnte wegen der Bedeutung der Einspeisung nicht angewendet werden. Durch die Entscheidung für den Einbau von Isoliertransformatoren war man in der Wahl der Sternpunktbehandlung völlig frei.

Der Betrieb des Netzes von Anfang an mit unmittelbarer Sternpunktterdung und der Verzicht auf die Erdschlußlöschung wurde vor allem im Hinblick auf die mit zunehmendem Ausbau des Kabelnetzes zu erwartenden kapazitiven Erdschlußströme und die daraus resultierenden Kosten für die Erdschlußspulen bei Löschung des Netzes beschlossen. Die niederohmige Sternpunktterdung setzt einem weiteren Ausbau des Netzes keine Grenzen. Diese werden allein noch durch die dreipolige Kurzschlußleistung bestimmt. Die Bemessung der Erdungsanlagen für einpolige Erdschlußströme in Höhe von wenigstens 5 kA erfordert im städtischen Kabelnetz keinen übermäßigen Aufwand, zumal die Bodenverhältnisse in Hannover mit spezifischen Widerständen von rd. 150 bis 250 Ω m in 3 m Tiefe — diese Werte sinken mit zunehmender Tiefe weiter ab — nicht ungünstig sind.

Im 110-kV-Netz sind derzeit neben einem 80-MVA-Isolierungsumspanner für das 110-kV-Landesnetz und einem 64-MVA-Maschinentransformator sieben Transformatoren mit Übersetzungen auf 30 bzw. 10 kV eingebaut, von denen drei 113/30/10,5-kV-Transformatoren mit Dreiecksausgleichswicklungen (Schaltgruppe Yy0d5) mit einer Gesamtleistung von 96 MVA und einer resultierenden Nullimpedanz von rd. 30 Ω geerdet sind. Da bisher nur etwa eine Kurzschlußleistung von rd. 1000 MVA im 110-kV-Netz zu erwarten ist und der einpolige Erdschlußstrom überdies auch durch die Nullimpedanzen der Kabel begrenzt wird, konnte die festgelegte Grenze von 5 kA bisher ohne Einbau strombegrenzender Drosselspulen eingehalten werden. Diese Kurzschlußleistung entspricht einer Mitimpedanz von 12 Ω . Daraus ergibt sich das Verhältnis $Z_0/Z_1 = 30 \Omega/12 \Omega = 2,5$, eine Erdungsziffer von etwa 0,7 bis 0,8, ein einphasiger Erdschlußstrom von etwa 3,5 kA und ein dreiphasiger Kurzschlußstrom von 5,25 kA. Damit beträgt das Verhältnis des einphasigen Erdschlußstromes zum dreiphasigen Kurzschlußstrom etwa 0,65.

Zur Fehlererfassung im Netz ist ein dreipoliger Kabel-Längsdifferentialschutz sowie ein überlagerter Impedanzschutz vorhanden. Bisher liegen allerdings noch keine praktischen Erfahrungen vor, da Kabelfehler noch nicht auftraten. Seit der Inbetriebnahme führten nur zwei Betriebsfälle zu einer Auslösung, nämlich eine Kabelüberlastung und ein mechanischer Fehler in einem Umspannwerk.

30-kV-Netz

Das 30-kV-Netz mit rd. 180 km Systemlänge war ursprünglich (1928) ein reines Strahlennetz mit dem Kraftwerk Herrenhausen im Schwerpunkt. Im weiteren Ausbau wurde es vermascht und erhielt mehrere Einspeisungen aus dem angrenzenden 60-kV-Landesnetz. Zur Kurzschlußstrombegrenzung wurden in den vom Kraftwerk und den Einspeisungen ausgehenden Kabeln Drosselspulen eingebaut. Das Netz

war zunächst nicht gelöscht. Häufigere Störungen, die vermutlich auch zu erhöhten Überspannungen führten, beunruhigten den Netzbetrieb. Die auf 100 km Kabellänge bezogenen Fehler mit Erdschluß betrugen etwa 2,5 bis 4,5 im Jahr, die mittlere Fehlerdauer 2 bis 5 s.

Dies wurde zum Anlaß genommen, ab 1951 — der in Westdeutschland üblichen Praxis folgend — zur Erdschlußlöschung überzugehen, um die Auswirkungen der Erdschlüsse klein zu halten. Die drei Erdschlußspulen, ausgelegt für einen Erdschlußstrom von 645 A, wurden zunächst konzentriert im Kraftwerk aufgestellt. Sie sind in der Lage, den kapazitiven Erdschlußstrom des 30-kV-Netzes (z. Z. 582 A) voll zu übernehmen. Nach Einführung der Erdschlußlöschung betrug die Zahl der Fehler mit Erdschluß je 100 km und Jahr etwa 1,2 bis 8,2, die Erdschlußdauer jetzt 0,5 s bis über 2 h. Der hohe Wert 8,2 beruht hauptsächlich auf einer größeren Anzahl von Störungen an Kabelendverschlüssen infolge konstruktiver Mängel.

Die Fehlerhäufigkeit nahm, wie zu erwarten, durch die Einführung der Erdschlußkompensation im 30-kV-Netz nicht ab, wohl aber die Auswirkung der Störungen, so daß trotzdem von einer Beruhigung des Netzbetriebes und guten Erfahrungen mit der Erdschlußlöschung gesprochen werden kann. Selbstlöschende Erdschlüsse konnten im 30-kV-Netz nicht beobachtet werden. Aber es war auch während dieses Zeitraumes nicht möglich, Erdschlußwischer zu erfassen.

Mit der Überlagerung des 110-kV-Kabelnetzes war auch eine Umgestaltung des 30-kV-Netzes verbunden, das künftig in vier einzelne Teilnetze mit je etwa 70 bis 220 A Erdschlußstrom unterteilt werden soll. Die Erdschlußspulen wurden auf die bisher vorhandenen Netze verteilt, die seitdem um etwa 30 % unterkompensiert betrieben werden. Gleichzeitig wurde das Kabelnetz mit einem dreipoligen Längsdifferentialschutz und zur besseren Erfassung der Fehlerorte bei Erdschlüssen mit Erdschlußwischer-Relais aus-

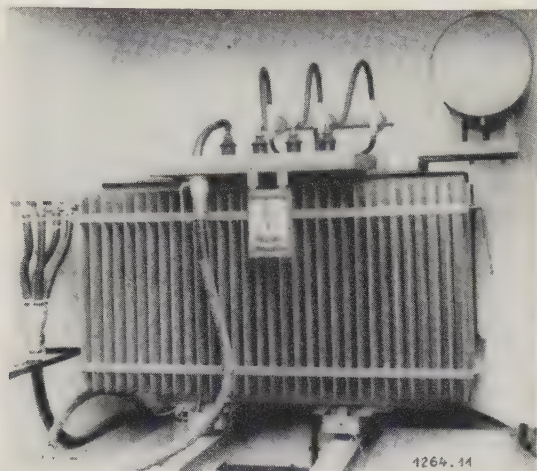


Bild 11. Sternpunktbildner.

gerüstet. Infolge der starken Unterkompensation führt nunmehr auch jeder einphasige Erdschluß ebenso wie jeder Kurzschluß und Doppelerdschluß zum Ansprechen des Differentialschutzes und damit zum selektiven Abschalten des betroffenen Kabels. Statt Minuten oder gar Stunden beträgt die mittlere Fehlerdauer nunmehr nur noch 0,3 s. Da in dem stark vermaschten 30-kV-Netz genügend Kabelreserven vorhanden sind, ist diese Betriebsweise keineswegs ungünstig. Erdschlußwischer und Doppelerdschlüsse wurden seit 1958 nicht registriert. Auf Grund dieser Erfahrungen stehen die Stadtwerke vor der Frage, ob das Netz in Zukunft vollkompensiert oder weiter mit möglicherweise erheblicher Verstimmung betrieben werden soll. Auch eine niederohmige Sternpunkterdung mit begrenztem Erdkurzschlußstrom ist nicht ganz von der Hand zu weisen, zumal ja bereits alle Einrichtungen zur Erfassung einphasiger Erdkurzschlußströme vorhanden sind.

10-kV-Netz

Das bisher in Betrieb befindliche 10-kV-Netz der Stadtwerke Hannover ist aus dem 5-kV-Netz hervorgegangen und hat gegenwärtig eine Systemlänge von etwa 700 km 6-kV-Kabeln und 12 km Freileitung. Nach Umstellung wird die gesamte Systemlänge des 10-kV-Netzes rd. 1000 km betragen. Die Notwendigkeit, die Leistungsfähigkeit des mit freiem Sternpunkt betriebenen 5-kV-Netzes zu erhöhen, führte zu einer schrittweisen Umstellung der Teilnetze auf 10 kV, die im Jahre 1954 begann und etwa im Jahre 1962 beendet sein wird. Das Netz war recht störanfällig, und es kam häufig vor, daß einfache Erdschlüsse in Doppel- oder Mehrfacherdschlüsse mit ihren weitreichenden Folgen übergingen, bevor sie gefunden und abgeschaltet werden konnten. In einem besonders extremen Falle wurde durch eine Gasspürkolonne ein Kabel im 5-kV-Netz derart beschädigt, daß ein intermittierender Erdschluß eingeleitet wurde, der zu zahlreichen weiteren Fehlern im Netze führte. Man war aus diesem Grunde bestrebt, die Erdschlüsse so schnell wie möglich abzuschalten, was aber in Anbetracht der starken Vermaschung des Netzes oft erst nach vielen vergeblichen Abschaltungen und mit erheblichem Zeitaufwand möglich war.

Um trotz der Umstellung auf eine höhere Spannung die Beanspruchung der Kabel möglichst gering zu halten, hat man die nichtwirksame bzw. halbstarre Sternpunkterdung

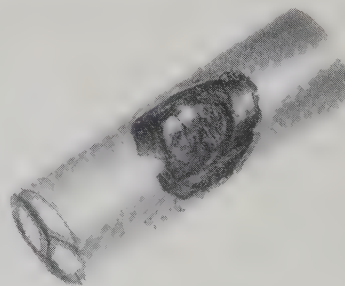
eingeführt. Dabei tritt bei Erdschluß zwar auch nahezu die Dreiecksspannung gegen Erde auf, doch ist diese Spannungserhöhung nur kurzzeitig wirksam, außerdem sind die Erdschlußüberspannungen niedriger als im Netz mit freiem Sternpunkt oder Erdschlußlöschung. Vor der Umstellung werden sämtliche Kabel einer Prüfung mit Gleichspannung nach VDE 0255, § 11, unterworfen, d. h. drei mal je 15 min mit einer Spannung von 34,5 kV geprüft. Fehler traten dabei fast ausschließlich nur in älteren Muffen oder Endverschlüssen auf.

Die 10-kV-Wicklungen der speisenden Umspanner sind im Dreieck geschaltet, so daß kein natürlicher Sternpunkt zur Verfügung stand und infolgedessen Sternpunktbildner (Bild 11) verwendet werden mußten. Diese sind in Zick-Zack-Schaltung ohne Sekundärwicklung ausgeführt. Sie sind so ausgelegt, daß ihre Nullreaktanz 7Ω beträgt, so daß keine zusätzliche Drosselspule zur Begrenzung des Erdkurzschlußstromes zwischen Sternpunkt und Erde benötigt wird. Je Netzteil sind zwei Sternpunktbildner vorgesehen, von denen jeweils einer in Reserve steht. Damit ist ein maximaler einphasiger Erdkurzschlußstrom bei einem Fehler unmittelbar am Sternpunktbildner von 825 A zu erwarten. Wegen der strombegrenzenden Wirkung der Kabelimpedanz beträgt der einphasige Erdkurzschlußstrom meist nur etwa 600 A. Die Erdungsziffer liegt damit nahezu bei 1. Die induktive Begrenzung hat den Vorteil, daß sich der induktive Widerstand geometrisch zum vorwiegend ohmschen Widerstand der Kabel addiert, so daß der Strom weitgehend unabhängig vom Fehlerort wird.

Versuche ergaben, daß der Fehlerstrom vorwiegend im Bleimantel der beschädigten Kabel zurückfließt und nur zum geringen Teil über im Boden liegende metallische Leiter, wie die Bleimäntel parallelverlegter Kabel, Rohre oder über Erde selbst. Dies beruht offensichtlich auf der Wirkung der Eisenbandbewehrung der Kabel. Eine Beeinflussung von fremden Anlagen oder Fernmeldeleitungen ist somit praktisch nicht zu erwarten.

Die Erfahrungen im 10-kV-Netz mit der nichtwirksamen Sternpunkterdung in Verbindung mit der Umstellung auf die höhere Spannung sind durchaus günstig. Besonders hervorzuheben ist, daß die oft stundenlange mühevollende Erdschlußsuche mit den die Abnehmer beunruhigenden Schaltmaßnahmen nicht mehr nötig ist; statt dessen werden die erdschlußbehafteten Kabel durch den Impedanzschutz mit dreipoliger Anregung selektiv abgeschaltet. Bei Erdschluß fließt der durch die Nullreaktanz des Sternpunktbildners verhältnismäßig niedrig eingestellte wohldosierte Erdkurzschlußstrom; der Fehler (Bild 12) wird abgeschaltet, bevor der hohe mehrphasige Kurzschlußstrom mit zerstörender Wirkung (Bild 13) einsetzen kann. Damit ist auch wegen der geringen Beanspruchung der Fehlerstelle häufig — im Gegensatz zu früher — die Ursache eines Fehlers noch feststellbar. Doppelerdschlüsse treten heute praktisch nicht mehr auf.

Erdschlüsse in Stickleitungen führen allerdings zu einer Abschaltung der dort angeschlossenen Abnehmer. Es muß dann für schnellste Abhilfe gesorgt werden. Dies gilt aber



1264. 12

Bild 12. Schadensstelle an einem 10-kV-Kabel ($3 \times 120 \text{ mm}^2$ Kupfer), verursacht durch einen einphasigen Erdkurzschluß bei einer Abschaltzeit von rd. 1 s.

ebenso für gelöschte Kabelnetze, wo der Betrieb unter Erdschluß auch nur einen kurzen Aufschub bringt. Es ist verständlich, daß die Vorzüge der niederohmigen Erdung deshalb im wesentlichen im vermaschten Netz zur Geltung kommen, wo die Abschaltung eines Kabels nicht zu einer Betriebsunterbrechung führt.

Im ganzen kann von einem sehr befriedigenden Ergebnis der nichtwirksamen Erdung im 10-kV-Netz gesprochen werden, vor allem im Hinblick auf den beträchtlichen Gewinn an Leistungsfähigkeit des Mittelspannungsnetzes, ohne daß dafür wesentliche Nachteile in Kauf genommen werden mußten.

Erfassung von Fehlern mit Erdberührung

Unabhängig von der Art der Sternpunktbehandlung werden zwei- und dreiphasige Kurzschlüsse mit oder ohne Erdberührung durch den üblichen Netzschutz, den Impedanz-, Konduktanz- oder Differentialschutz erfaßt [18 bis 20]. Dagegen macht die Ortung einpoliger Fehler in Netzen mit Erdschlußlöschung oder freiem Sternpunkt wegen der geringen Ströme oft erhebliche Schwierigkeiten. Der wirtschaftliche Aufwand für die Erfassung einpoliger Fehler in Mittelspannungs-Kabelnetzen kann daher leicht die Entscheidung zugunsten der einen oder anderen Art der Sternpunktbehandlung beeinflussen.

Die zunächst einfachste und billigste Lösung ist, auf Geräte zur Erdschlußsuche zu verzichten und den Fehler durch vorübergehendes Abschalten von Netzteilen oder auch einzelner Kabel und Leitungen zu suchen — ein Verfahren, das bei Mittelspannungsnetzen häufig angewendet wird, jedoch bei ausgedehnten und vermaschten Netzen recht langwierig ist und deshalb besonders auch in Netzen mit Freileitung immer einen Wettlauf mit dem früher oder später doch einsetzenden Doppelerdschluß oder Kurzschluß bedeutet, abgesehen davon, daß durch die Schaltmaßnahmen eine Beunruhigung der Abnehmer entsteht. Will man jedoch den Erdschlußort oder zumindest die Richtung, in der er liegt, erfassen, so müssen die für einen Erdschluß oder Erdkurzschluß charakteristischen Größen gemessen werden, und zwar die Nullspannung U_0 ; sie kann z. B. über die offene Dreieckwicklung von drei Einphasenspannungswandlern, aber auch über einen Wandler im Sternpunkt oder eine Zusatzwicklung für Spannungsmessung der Erdschlußspule erfaßt werden (Bild 14). Eine weitere charakteristische Größe ist der Nullstrom I_0 ; er wird durch Parallelschaltung der drei Stromwandlerwicklungen ermittelt. Günstiger ist die direkte Messung des Summenstroms über einen Kabelumbauwandler um alle drei Leiter.

Dies gilt gleichermaßen für Netze mit freiem Sternpunkt, Erdschlußlöschung oder niederohmiger Sternpunktterdung. In Netzen mit freiem Sternpunkt fließt der gesamte kapazitive Erdschlußstrom zum Fehlerort. Die Erdschlußrelais bilden das Produkt aus Nullstrom und Nullspannung, also in diesem Falle entsteht eine Blindleistung. Im Netz mit Erdschlußlöschung fließen die kapazitiven Erdschlußströme zu den Erdschlußdrosseln. Sie können also nicht zur Fehlererfassung herangezogen werden. Zum

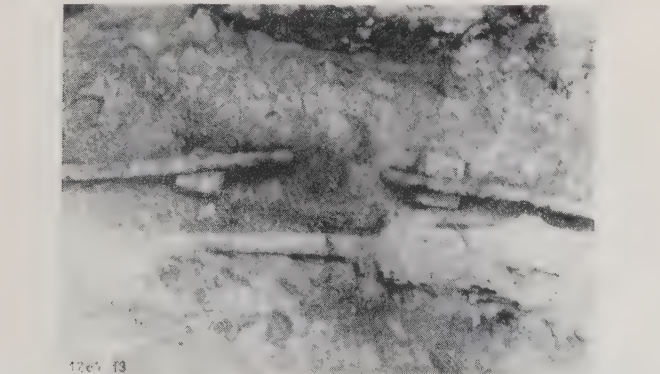


Bild 13. Schäden an einem 10-kV-Kabel (3 x 70 mm² Kupfer) bei einem dreiphasigen Erdkurzschluß.

Fehlerort fließt lediglich der Wirk-Reststrom, aus dem nunmehr das Produkt mit der Nullspannung, also in diesem Falle eine Wirkleistung gebildet wird. Kann der den normalerweise bereits unsymmetrischen Leiterströmen überlagerte Wirk-Reststrom in kleinen Netzen nicht einwandfrei erfaßt werden, so ist seine Vergrößerung durch Parallelschalten eines Widerstandes zur Erdschlußspule möglich.

Aus der Richtung des Nullstromes bzw. der Nulleistung wird dann in beiden Fällen auf die Lage des Fehlerortes geschlossen. Soll selektiv abgeschaltet werden, so müssen diese Erdschlußleistungs-Relais eine leistungsabhängige Charakteristik bekommen und überdies eine zeitliche Staffelung, wenn der Nullstrom über mehrere hintereinanderliegende Leitungsabschnitte zur Fehlerstelle fließt (Bewag).

Die Erfassung eines einpoligen Fehlers erfordert, da

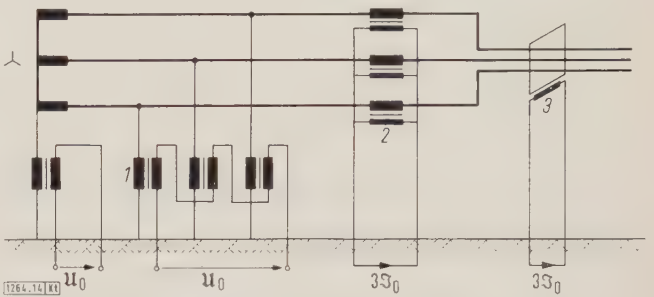


Bild 14. Prinzipschaltbild zur Messung der Nullspannung und des Nullstromes.
1 drei Spannungswandler 2 drei Stromwandler 3 Kabelumbauwandler

dieser Fehler auf allen drei Leitern möglich ist, einen dreipoligen Schutz mit drei Wandlern oder zumindest einem Kabelumbauwandler. Der Aufwand in einem Kabelnetz für den dritten Stromwandler je Abzweig ist bei Spannungen unter 20 kV größer als der Aufwand für die Löscheinrichtungen. Erst wenn technische oder betriebliche Gründe eine Erdschlußerfassung und damit den dritten Wandler sowieso erfordern, wird der Aufwand für die niederohmige Sternpunktterdung mit dem Aufwand für die Erdschlußlöschung durchaus vergleichbar sein.

Zusammenfassung

Die Sternpunktbehandlung in städtischen Kabelnetzen bringt zahlreiche Probleme und Fragen mit sich, die hier nicht erschöpfend behandelt werden können, zumal die meisten Erfahrungen in Westdeutschland im Mittelspannungsgebiet bei Betrieb mit Erdschlußlöschung und freiem Sternpunkt vorliegen. Man ist sich wohl darüber einig, daß kleine Netze mit freiem Sternpunkt einen sicheren Betrieb gewährleisten, der jedoch bei zunehmender Ausdehnung durch erhöhte Überspannungen und wachsende kapazitive Erdschlußströme mehr und mehr beeinträchtigt wird. Die Erdschlußlöschung, deren natürliches Anwendungsgebiet das Freileitungsnetz ist, verliert im reinen Kabelnetz einen ihrer wesentlichsten Vorteile fast ganz: die selbsttätige Löschung des Erdschlußlichtbogens. Der geringe Reststrom schont zwar die Fehlerstelle, führt jedoch leider auch zu Schwierigkeiten bei der Erfassung des Fehlerortes. Ein lange dauernder Betrieb unter Erdschluß ist dann möglich, aber leider auch oftmals nicht zu vermeiden.

Die niederohmige Sternpunktterdung schafft durch die sofortige Abschaltung des Fehlers klare Verhältnisse, die allerdings im vermaschten Netz mehr geschätzt werden als im Strahlennetz. Begrenzte Erdkurzschlußströme vermeiden starke Zerstörungen an der Fehlerstelle, außerdem schont auch die geringere und kurzzeitige Überbeanspruchung bei Erdkurzschluß den Werkstoff. Unvermeidlich ist die Ausstattung aller Abzweige mit Wandlern zur einwandfreien Erfassung des Nullstromes, was bei Spannungen unter 20 kV oft zusätzlichen Aufwand bedeutet. Die Vorzüge der Erdschlußlöschung sind unbestritten, doch wird wohl auch in Deutschland die niederohmige Sternpunktterdung in städtischen Kabelnetzen künftig mehr als bisher Eingang finden.

Schrifttum

- [1] Fortescue, C. L.: Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks. Trans. Amer. Inst. elect. Eng. Bd. 37 (1918) S. 1027—1140.
- [2] Wagner, C. F., u. Evans, R. D.: Symmetrical components. Mc-Graw-Hill Book Company, New York u. London 1933.
- [3] Roeper, R.: Kurzschluß-Ströme in Drehstromnetzen. Verlag der Siemens-Schuckertwerke AG, Erlangen 1957.
- [4] Dorsch, H.: Beitrag zur Frage der Isolationsbemessungen von Anlagen in 110-kV-Netzen mit Kabeln und Freileitungen. VDE-Fachber., Bd. 19 (1956), S. I/45—52.
- [5] Feist, K.-H.: Der Einfluß der Sternpunktbehandlung auf die Bemessung der Erdungsanlagen in Hochspannungsnetzen. Elektr.-Wirtsch. Bd. 57 (1958), S. 105—112.
- [6] Hosemann, G., u. Oeding, D.: Bemessung von Erdungsanlagen, besonders bei starrer Sternpunktterdung. Elektr.-Wirtsch. Bd. 59 (1960), S. 213—218.
- [7] Erche, M., u. Schmidt, K.: Beeinflussung eines gelöschten Netzes durch hohe Erdkurzschlußströme eines benachbarten Netzes. ETZ-A Bd. 80 (1959), S. 7—11.
- [8] Erche, M.: Untersuchung über die Entstehung hoher Erdschluß-Überspannungen in gelöschten oder mit freiem Sternpunkt betriebenen Hochspannungsnetzen. VDE-Fachber. Bd. 20 (1958), S. 52—60.
- [9] Application guide on methods of neutral grounding of transmission systems. AIEE Committee Report. Trans. Amer. Inst. elect. Eng. (III) Bd. 72 (1953) S. 663—668.
- [10] System electrical neutral grounding Part. I, Nov. 1943. Electric Light and Power 1943, S. 44—49.
- [11] Anleitung zur Berechnung der in Fernmeldeanlagen durch Kurzschlüsse oder Doppelerdschlüsse an Drehstrom-Hochspannungsleitungen induzierten Längs-EMK. Fernmeldetechn. Zentralamt II E. Technische Empfehlung Nr. 1 vom 12. Juli 1961.
- [12] Anleitung zur Berechnung der in Fernmeldeleitungen durch Kurzschlüsse oder Doppelerdschlüsse an Hochspannungsleitungen induzierten Spannungen. Fernmeldetechn. Zentralamt. Technische Empfehlung Nr. 1, Januar 1959.
- [13] Roser, H.: Die technischen Probleme der Drehstrom-Fernübertragung mit 400 kV. ETZ Bd. 69 (1948) S. 7—11.
- [14] v. Mangoldt, W.: Gedanken zur Sternpunktbehandlung bei 380-kV-Drehstromübertragung. ETZ Bd. 71 (1950) S. 462—469.
- [15] Simon, P.: Schutz von Nachrichtenkabeln in stark induktiv beeinflussten Gebieten. Frequenz Bd. 11 (1957) S. 82—86.
- [16] Lau, H.: Die Beeinflussung von Fernmeldekabeln durch Starkstromleitungen und der Kabelreduktionsfaktor von Blei- und Wellmantelkabeln. Fernmeldetechn. Z. Bd. 8 (1955) S. 153—162.
- [17] Lenz, F.: Betrieb von Kabelnetzen mit kurzgeerdetem Sternpunkt. Elektr.-Wirtsch. Bd. 56 (1957) S. 155—158.
- [18] Warreimann, E.: Erdschlußfassung und Sternpunktbehandlung in Mittelspannungsnetzen. Elektr.-Wirtsch. Bd. 57 (1958) S. 534—543.
- [19] Geise, Fr.: Erdschluß und Erdschlußrelais. Siemens-Z. Bd. 26 (1952) S. 78—84.
- [20] Poßner, O.: Die Auswahl geeigneter Schutzeinrichtungen für Mittelspannungsnetze. AEG-Mitt. Bd. 49 (1959) S. 207—217.
- [21] Sternpunktbehandlung in Hochspannungsnetzen. Techn. Ber. Nr. 181 vom 30. Okt. 1957, Studienges. f. Hochspannungsanlagen.
- [22] Schulze, E.: Die Sternpunktbehandlung von Hochspannungskabelnetzen. V.I.K.-Berichte Nr. 101, Juli 1960.
- [23] Willheim, R., u. Waters, M.: Neutral grounding in high-voltage transmission. Elsevier Publishing Company, New York 1956.
- [24] Müller-Guntrum, U.: Einige Gesichtspunkte bei der Planung städtischer 110-kV-Netze. Elektr.-Wirtsch. Bd. 59 (1960) S. 669—675.
- [25] Schulze, E.: Das 110-kV-Netz von West-Berlin. Elektr.-Wirtsch. Bd. 58 (1959) S. 313—318.
- [26] Baatz, H.: Sternpunktterdung in Hochspannungsnetzen. In „Fort-schritte der Hochspannungstechnik“, Bd. 2. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1954.

Erfahrungen mit der Sternpunktterdung eines 110-kV-Stadtnetzes

Von Hans Böhm, Berlin*)

DK 621.316.999 : 621.316.13.027.811

In 110-kV-Netzen von Großstädten mit erheblichem Anteil an Kabeln erreichen Ladeleistung und kapazitiver Erdschlußstrom hohe Werte. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen ist es deshalb notwendig, sich rechtzeitig über die Behandlung des Sternpunktes klar zu werden. Die nachstehenden Ausführungen zeigen, welche Fragen dabei gelöst werden müssen, und berichten über die Betriebserfahrungen der Bewag in ihrem 110-kV-Netz, dessen Sternpunkt starr geerdet ist.

110-kV-Netz von West-Berlin

Die Bewag hat im November 1957 den Sternpunkt ihres 110-kV-Netzes starr geerdet. Im folgenden wird darüber berichtet, welche Überlegungen dazu geführt haben, welche Voruntersuchungen angestellt und welche vorbereitenden Maßnahmen für erforderlich gehalten wurden, bevor zur Erdung des Sternpunktes übergegangen werden konnte. Der zweite Teil der Ausführungen wird sich mit den 3^{1/2}-jährigen geringen Betriebserfahrungen und dem in Kürze beabsichtigten Übergang zur halbstarren Erdung befassen.

Nach dem Kriege mußte in West-Berlin aus technischen und wirtschaftlichen Gründen dem vorhandenen Netz mit den drei Spannungen (Niederspannung, 6 und 30 kV) ein 110-kV-Netz überlagert werden. Den Anlaß dazu gab die große Zunahme des Stromverbrauches der Stadt, die starke Leistungskonzentration im Kraftwerk Reuter, das im Nordwesten gelegen ist, und der erhebliche Leistungsbedarf im Süden, der etwa ein Drittel der Gesamtlast beträgt.

Das 110-kV-Netz dient nicht nur der Leistungsabfuhr in entfernte Verteilungsschwerpunkte, sondern auch dem Verbundbetrieb sämtlicher West-Berliner Kraftwerke. Das 30-kV-Kabelnetz ist jetzt ausschließliches Verteilungsnetz, dessen Leistungsfähigkeit sich hierdurch nennenswert gesteigert hat. Es ist in z. Z. sechs einzelne Teile aufgelöst, die als Radialnetze betrieben werden (Bild 1).

Das 110-kV-Netz wird im Endzustand aus mehreren 110-kV-Ringen mit besonders leistungsstarken Durchmesser-Verbindungen West-Ost und Nord-Süd bestehen. Es stellt die Sammelschiene der Berliner Energiequellen dar und ermöglicht auch weiterhin ihren wirtschaftlichen Einsatz. Selbstverständlich erhalten sowohl die Ringe als auch die Diagonalverbindungen verschiedene Trassenführung, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen und andere Stadtgebiete erfassen zu können.

Mit Rücksicht auf die Insellage von West-Berlin ist man gezwungen, das 110-kV-Netz aus Sicherheitsgründen in zwei Teilen zu betreiben. Vorteilhafterweise werden dadurch gleichzeitig die Kurzschlußleistungen und die Erdkurzschlußströme klein gehalten. Fallen bei einer Großstörung beide Netze auseinander, so ist Vorsorge getroffen, daß auch in beiden Teilnetzen die Frequenzhaltung gesichert ist.

Beide Netze müssen heute notgedrungen über 30 kV synchron gehalten werden. Das geschieht in den 110/30-kV-Abspannwerken und über die 110/30-kV-Kuppeltransformatoren in den Kraftwerken, die dem Leistungsausgleich zwischen dem 110- und 30-kV-Netz dienen und außerdem für Störungen und Überholungen im Kraftwerk Reserve bilden. Zu gegebener Zeit wird das 110-kV-Netz an das überregionale 220- oder 380-kV-Verbundsystem angeschlossen werden. Die 30-kV-seitige Kupplung wird dann aufgehoben, damit Ausgleichsvorgänge über das 30-kV-Netz vermieden werden.

Die Diagonalverbindungen bestehen im Endzustand aus Doppelkabeln mit einem gemeinsamen Schalter. Dadurch ist es möglich, teure 110-kV-Zellen einzusparen, sich dem Lastanstieg gut anpassen zu können, die Vorinvestitionen klein zu halten und schneller zu einem beweglicheren 110-kV-Netz zu kommen. Ein gewisser Nachteil ist die damit verbundene höhere Ladeleistung des Netzes. Sie stellt jedoch am Tage eine willkommene billige Kompensation der Magnetisierungsströme der vielen Motoren und Transformatoren dar. Nachts müssen entweder Teilstrecken abgeschaltet oder

*) Dipl.-Ing. H. Böhm ist Leiter der Elektrotechnischen Abteilung der Berliner Kraft- und Licht (Bewag)-AG.

— wenn dies aus betrieblichen Gründen in ausreichendem Maße nicht mehr möglich ist — Drosselspulen zum Ausgleich des Ladestromes eingesetzt werden. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden diese Drosselspulen nicht an die 110-kV-Schiene, sondern an die 30-kV-Sammelschiene der Abspannwerke angeschlossen. Die geringeren Kosten dieser Schaltzellen gestatten auch eine stärkere Unterteilung der Spulenleistung und damit einen individuelleren Einsatz. Die mit dem 30-kV-Anschluß verbundene Belastung der Abspanner stört nicht, da sie nur während der lastschwachen Zeit vorhanden ist.

Gründe für eine starre oder halbstarre Sternpunktterdung

Das in Bild 1 gezeigte 110-kV-Netz wird im Jahre 1962 insgesamt 33 km Systemlänge an Freileitungen und 91 km Systemlänge an Otkabeln umfassen. In seinem heute übersehbaren Endzustand wird das Netz eine Ladeleistung von rd. 300 Mvar und damit einen kapazitiven Erdschlußstrom

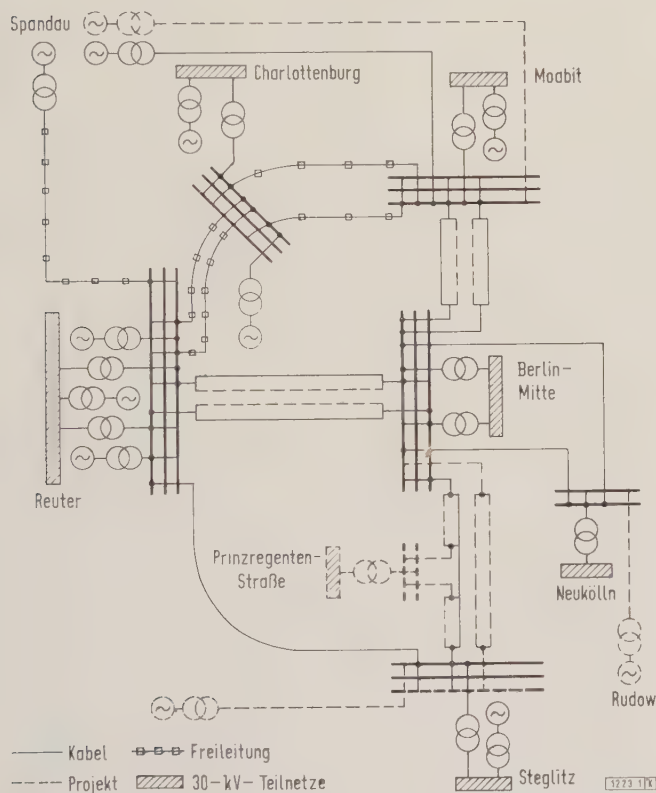


Bild 1. Grundschaltbild des 110-kV-Netzes von West-Berlin, Stand 1962.

von nahezu 5000 A haben. Dabei ist die etwa spiegelbildliche Ergänzung durch die Stromversorgungsanlagen von Ost-Berlin bereits berücksichtigt.

Um Fehlinvestitionen zu vermeiden, mußte man sich frühzeitig über die Behandlung des Sternpunktes klarwerden. Sie ist außerdem entscheidend für das betriebliche Verhalten der Netze beim Auftreten von Erdschlüssen.

Die grundsätzlichen Fragen können mit Rücksicht auf die Ausführungen von Prof. Baatz und Dipl.-Ing. Mestermann kurz behandelt werden. Vorweg sei betont, daß vermutlich die Frage der Sternpunktbehandlung eines 110-kV-Netzes nicht allgemeingültig beantwortet werden kann. Man muß die jeweiligen Netzverhältnisse gründlich analysieren, damit von Fall zu Fall die richtige Entscheidung getroffen wird.

Ein Betrieb mit isoliertem Sternpunkt ist bei 110-kV-Großstadtnetzen wegen der hohen Überspannungen und Überströme, die als Folge von Erdschlüssen auftreten und zu Kurzschlüssen und Versorgungsstörungen führen können, abzulehnen.

Die induktive Erdschlußlöschung wird in großen Netzen schon seit langer Zeit mit Erfolg angewendet, um die Kapazitätsströme von der Erdschlußstelle abzusaugen. In 110-kV-Freileitungsnetzen mit Erdschlußströmen bis zu etwa 2000 A werden die entstehenden Erschlußlichtbögen meistens noch gelöscht. In Kabelnetzen mit kapazitiven Erdschlußströmen von einigen Kiloampere dagegen ist die Löschung auch bei genauer Kompensation kaum wahrscheinlich. Das vom Erdschluß betroffene Kabel muß bald abgeschaltet werden, damit die thermische Beanspruchung der Kabelisolation durch den Erdschluß-Reststrom nicht zum Kurzschluß führt. Bei großen Kabelnetzen nimmt dieser Reststrom so hohe Werte an, daß Erdschlüsse trotz bester Kompensation und gutem Isolationszustand der Kabel sofort in Kurzschlüsse übergehen. Ein Abschalten des Erdschlusses ist also nicht mehr möglich. Man muß in solchen Fällen die Netze aufteilen und diese Teilnetze zweckmäßigerweise über eine höhere oder niedrigere Spannungsebene an nur wenigen Stellen mittels Transformatoren kuppeln. Da eine einwandfreie Erdschlußlöschung in 110-kV-Netzen bei Restströmen von mehr als 100 A aufhört, sind der Kompensation bei großen Kabelnetzen bald Grenzen gesetzt. Es kann daher die starre oder halbstarre Sternpunktterdung technisch notwendig werden.

An dieser Stelle sei eingeflochten, daß die Bewag seit Jahrzehnten ihre 6-kV-Kabelnetze der einzelnen Abspannwerke mit isoliertem Sternpunkt betreibt. Sie sind galvanisch getrennt und weisen z. Z. Erdschlußströme von 50 bis 225 A auf. Das große vermaschte 30-kV-Kabelnetz wurde lange Jahre mit Erdschlußlöschung und selektiv abschaltendem Erdschlußschutz betrieben. Der Erdschlußstrom war im gesamten Berliner Netz rd. 4000 A. Nach der Trennung des Netzes im Jahre 1952 in einen östlichen und einen westlichen Teil betrug er in West-Berlin etwa 2000 A. Das West-Netz wurde nach Überlagerung der 110-kV-Spannung in Teilnetze aufgelöst, die nunmehr isolierte Sternpunkte haben. Lediglich eines dieser Teilnetze, das einen Erdschlußstrom von rd. 600 A hat, wird noch mit Petersenspulen betrieben.

Im starr geerdeten Netz sind die Erdschlußüberspannungen am geringsten, und die Anlage erfährt bei Erdschlüssen eine kleinere Spannungsbeanspruchung gegen Erde als in Netzen mit nicht starr geerdetem Sternpunkt. Die Leitsätze VDE 0111/2. 61 kennzeichnen die starre Erdung dadurch, daß die Spannung zwischen einem gesunden Hauptleiter und Erde bei einem Erdschluß in keinem Fall höher als die 0,8-fache Betriebsspannung zwischen zwei Hauptleitern ist; das entspricht dem 1,4-fachen Normalwert der Sternspannung des Netzes.

Ihr wirtschaftlicher Vorteil besteht darin, daß die Beschaffung und Aufstellung von Erdschlußspulen entfällt, während die Aufwendungen für sämtliche Maßnahmen zur Durchführung des Betriebes mit starrer Sternpunktterdung meist nur einen Bruchteil davon betragen.

Die Bewag hatte sich daher Ende 1955 entschlossen, den Sternpunkt ihres 110-kV-Netzes starr zu erden. Der Entschluß wurde ihr durch die Insellage Berlins erleichtert. Der Erdkurzschlußstrom wurde auf den der Planung zugrunde gelegten Wert von etwa 5 kA begrenzt.

Für das vorhandene Netz der Bewag waren nur etwa 60 % des Aufwandes notwendig, der bei Erdschlußlöschung erforderlich wäre. In diesem Vergleich sind die Kosten für die Anpassung der Schutzeinrichtungen an den Betrieb mit starrer Sternpunktterdung enthalten. Dabei ist zu beachten, daß bei dieser Lösung mit jedem neu in Betrieb kommenden 110-kV-Kabel die Zahl der einzubauenden Petersenspulen erhöht werden müßte, sich also der Differenzbetrag weiter vergrößert. Da die 110/30-kV-Abspanner in der Schaltgruppe Yd 11 geschaltet sind, also damit die einphasige Belastbarkeit des Transformators gegeben ist, waren in beiden Fällen hierfür keine Investitionen notwendig. Für den Netzaufbau nach dem Stand 1962 werden die Aufwendungen für halbstarre Erdung gegenüber Erdschlußlöschung nur noch rd.

45 % betragen. Die Kosten für die induktiven Sternpunkt-widerstände sind dabei schon berücksichtigt.

Von dem nach den Leitsätzen VDE 0111 möglichen geringeren Isoliervermögen der Betriebsmittel wurde kein Gebrauch gemacht, weil die Kostenersparnisse bei 110 kV klein sind und die Erdungsziffer $\leq 0,8$ bleiben muß, also die Planung eingengt würde. Andererseits bedeutet dies aber eine wesentliche Erhöhung der Betriebssicherheit der Anlagenisolation.

Lösung der Probleme bei starrer Sternpunktterdung

Im starr geerdeten Netz bedeutet jeder Erdschluß einen einpoligen Kurzschluß mit großem Fehlerstrom. Er fließt von den Generatoren über den betroffenen Leiter bis zur Fehlerstelle und tritt dort in den Rückleiter, nämlich in Erde, Blitzseile, Kabelmäntel sowie andere metallisch leitende Wege ein, von wo aus er zu den Stellen zurück-

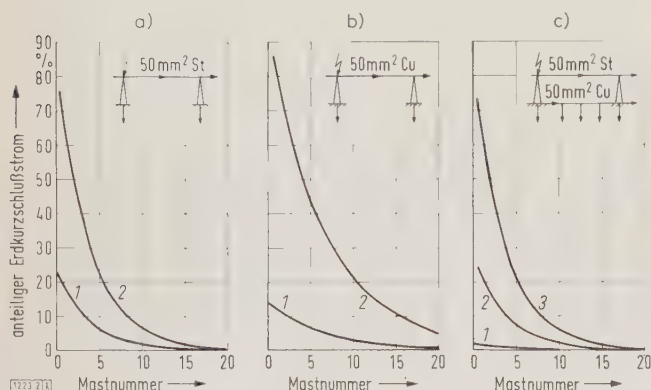


Bild 2. Aufteilung des Erdkurzschlußstromes einer 110-kV-Freileitung auf Mastender sowie Blitz- und Bodenseil bei einem vorhandenen Blitzschutzseil a) aus Stahl, b) aus Kupfer und c) aus Stahl mit zusätzlichem Bodenseil aus Kupfer.

- 1 Strom durch den Mastender 2 Strom durch das Blitzseil
3 Strom durch das Bodenseil

kehrt, in denen der Sternpunkt von Transformatoren geerdet ist. Er bewirkt eine große Beanspruchung der Betriebsmittel und ruft an den Stationserden und Freileitungsmasten sowie an Kabelarmaturen Erderspannungen hervor. Als Folge hiervon treten Schritt- und Berührungsspannungen auf. In den Vorschriften VDE 0141/11.58, § 27, wird daher bei Erdkurzschluß eine Schnellausschaltung gefordert. Für die Bemessung der Erdungsanlage ist der über sie fließende Anteil des Erdkurzschlußstromes im Augenblick der Ausschaltung mit der Schnellstufe maßgebend. Hierbei ist in Netzen mit Nennspannungen von 110 kV und darüber die Erderspannung nicht auf 125 V begrenzt. Die Erder sind jedoch nach Möglichkeit so anzulegen, daß eine Gefährdung durch Schritt- und Berührungsspannungen weder innerhalb noch außerhalb des Geländes der Hochspannungsanlage auftritt. Das gilt als erfüllt, wenn bei einer Gesamt-Ausschaltzeit der Schnellzeitstufe von 0,2 s, die den Planungen zugrunde gelegt war, Werte für Schrittspannungen von 140 bzw. 275 V und für die Berührungsspannungen von 135 bzw. 275 V je nach Örtlichkeit nicht überschritten werden.

Dem Problem der Erderspannungen und den damit verbundenen Schritt- und Berührungsspannungen wurde viel Zeit gewidmet. Es wurden sowohl theoretische Überlegungen und Berechnungen als auch entsprechende Versuche durchgeführt, um diejenigen Maßnahmen ausfindig zu machen und zu überprüfen, die eine Verminderung dieser Spannungen auf ausreichend niedrige Werte bewirken. In diesem 110-kV-Netz können Erdschlüsse grundsätzlich in Anlagen, an Kabeln und an Freileitungen auftreten.

In den Kraft- und Abspannwerken wurden alle auf dem Gelände befindlichen geerdeten Teile wie Stahl-

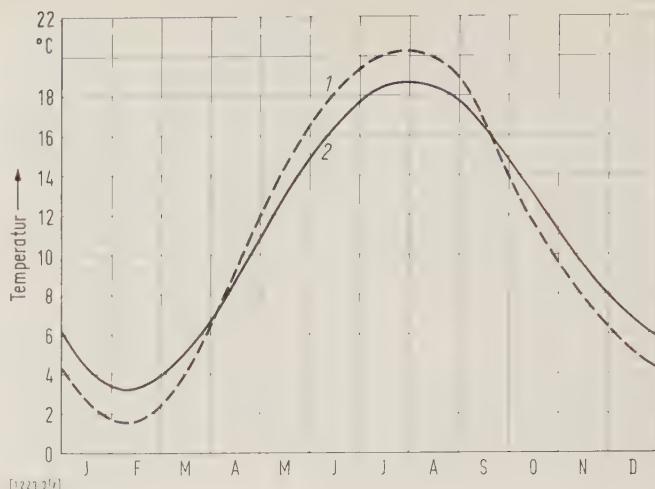


Bild 3. Durchschnittliche Erdbodentemperatur in Berlin im Verlauf eines Jahres; Meßstelle Neukölln, Mittelwerte aus den Jahren 1950 bis 1960.

- 1 in 0,5 m Tiefe 2 in 1,0 m Tiefe

gerüste, Wasser- und Druckluftleitungen, Ölbehälter, Spundwände, deren Stoßstellen verschweißt sind, Poller zum Festmachen der Schleppkähne, Ölentladestellen, Eisenbahn- und Kranschienen, Kabelmäntel u. dgl. gut leitend miteinander und mit der eigentlichen Erderanlage der 110-kV-Station verbunden. Damit wurde eine Äquipotentialfläche geschaffen, so daß bei Erdschluß innerhalb der Anlage keine unzulässigen Schritt- und Berührungsspannungen auftreten können.

Die durchgeführten Messungen des Gesamt-Ausbreitungswiderstandes dieser Anlagen haben Werte von rd. 5 bis 15 m Ω ergeben. Weiter wurde durch Netzversuche festgestellt, daß bei Speisung eines in einer Anlage entstandenen Erdkurzschlusses über Freileitungen etwa 85 % dieses Stromes über den Stationserder fließen, bei Kabelspeisung dagegen nur etwa 25 bis 30 %. Bei einem Erdkurzschlußstrom von 5 kA treten also gegenüber der Bezugserde nur Spannungen von etwa 6 V bis höchstens 65 V auf, deren Verschleppen auch nach außen ungefährlich ist.

Bei einem Erdkurzschluß in einer Kabelstrecke fließt der größte Teil des Stromes im Mantel zu den Transformatoren-Sternpunkten zurück. Nur ein geringer Teil nimmt den Weg durch das Erdreich. Jedoch kann z. B. durch Kupferrohre, die bei Ölkabeln die Sperrmuffen mit den oberirdischen Manometern verbinden, Potential an die Erdoberfläche verschleppt werden. Obwohl durch Versuche festgestellt wurde, daß selbst bei Fehlern in unmittelbarer Nähe der Manometerschränke noch keine unzulässigen Schritt- und Berührungsspannungen auftreten, wurden vorsichtshalber doch Isolierstücke in die Ölleitungen eingesetzt oder das Armaturengestell gegen die Abdeckhauben und die Sockel isoliert. Besser ist es, in Zukunft an Stelle der Kupferrohre nur noch Ölleitungen aus Kunststoff zu verlegen.

Wesentlich ungünstiger als in reinen Kabelnetzen liegen die Verhältnisse beim Auftreten eines Fehlers an einem Freileitungsmast. Der Erderwiderstand dieser Freileistungsmaste schwankt zwischen 2 bis 12 Ω . Durch das Parallelschalten der Maste über das Blitzseil wird der Ausbreitungswiderstand wesentlich herabgesetzt. Außer dem vom Fehler betroffenen Mast nimmt dann — wie Bild 2 zeigt — auch eine Anzahl der Nachbarmaste Spannungen an, die mit der Entfernung von der Fehlerstelle geringer werden. Der Masterderstrom und damit die Mastspannung werden noch weiter herabgesetzt, wenn man für das Blitzseil einen Werkstoff mit besserer Leitfähigkeit, z. B. Kupfer (Bild 2 b) wählt. Abgesehen davon, daß die Festigkeit der vorhandenen Maste nicht ausreichte, um ein Erdseil aus Kupfer zu tragen, genügte auch die Herabsetzung der Mastspannung noch nicht, um ausreichend niedrige Schritt- und

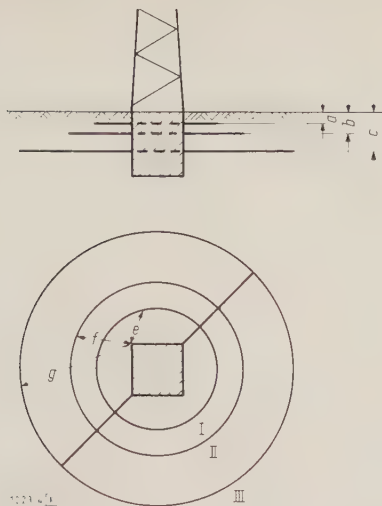


Bild 4. Anordnung der Potential-Steuerringe um Freileitungsmaste mit Blockfundament.

Anordnung	Abmessungen in Metern					
	a	b	c	e	f	g
I, 1 Ring	0,15	—	—	0,7	—	—
II, 2 Ringe	0,15	0,25	—	0,5	1,0	—
III, 3 Ringe	0,15	0,25	0,6	0,5	1,0	2,0

Berührungsspannungen zu erreichen. Zur weiteren Stromentlastung des betroffenen Masterders wurde die Wirkung eines Kupferseiles als langgestreckter Banderder untersucht (Bild 2 c). Dieses „Bodenseil“ führt etwa 75 % des Erdkurzschlußstromes ab. Während im Falle a etwa 24 % des Erdkurzschlußstromes über den Masterder fließen, sind es im Falle b nur noch 14 %. Im Falle c ist der Masterderstrom auf nur knapp 2 % des Erdkurzschlußstromes zurückgegangen. Dementsprechend sinkt auch die Masterderspannung.

Bei Annahme eines Erdkurzschlußstromes von 5 kA beträgt der Spannungsabfall am Masterder im Fall a rd. 12 kV, im Fall b rd. 7 kV und im Falle c etwa 1 kV. Im Falle b ist die Masterderspannung nur wenig mehr als halb so groß wie im Falle a, aber es werden mehr Maste von dem Erdkurzschluß in Mitleidenschaft gezogen. Am 10. Mast, vom Erdschlußort an gerechnet, ist der Masterderstrom im Fall a auf 1,6 %, im Falle b auf 3,1 % und im Fall c auf 0,1 % abgeklungen.

Ein praktischer Versuch, durch Anschließen von vier Schienen einer neben einer Freileitung verlaufenden Straßenbahnlinie und wahlweise von einem oder zwei Kupferseilen, die in die Erde gelegt wurden, bestätigte die theoretischen Überlegungen. Diese Erkenntnisse wurden außerdem durch Hochstromversuche bis zu 2000 A erhärtet und ausgeweitet. Dabei wurden sämtliche Meßgrößen wegen der kurzen Versuchsdauer von 0,2 bis 0,4 s oszillographiert. Da während der Versuche ein Stück des 2 km langen Kupferbodenseiles gestohlen wurde, entschied man sich für einen Stahlleiter von (8 × 50) mm², der flammenstrahlverzinkt ist und etwa den Gleichstromleitwert eines Kupferseiles von 50 mm² Querschnitt hat. Er wurde ohne Abdecksteine verlegt, verbindet sämtliche Maste einer Leitung miteinander und ist an die Stationserderanlagen angeschlossen.

Durch die Verlegung des Bodenleiters werden außerdem der Stoßausbreitungs-widerstand gemäß VDE 0142, § 32, herabgesetzt und so bei Ableitung von Blitzströmen Kurzschlüsse durch rückwärtige Überschlüge vermieden, die von einem oder mehreren Leitern zur Traverse stattfinden können. Der von dem angeschlossenen Mast in den Bodenleiter eintretende Strom verringerte sich längs des Bodenleiters innerhalb eines Mastfeldes infolge Querableitung zum Erd-

reich um etwa 30 %. Die Verminderung ist abhängig von der mehr oder weniger guten Leitfähigkeit des Erdbodens in der näheren Umgebung des Bodenleiters. Ganz trockenes oder völlig gefrorenes Erdreich leitet den elektrischen Strom sehr schlecht. Bei einer Verlegungstiefe des Bodenleiters von 60 cm glaubte man diesen ungünstigen Bereich gemieden zu haben. Den Jahresverlauf der mittleren Erdbodentemperatur an der Meßstelle Berlin-Neukölln zeigt Bild 3 für eine Tiefe von 0,5 und 1 m.

Die Maste wurden durchgehend oder im Stich angeschlossen, — im Stich, wenn eine Trassenführung des Bodenleiters direkt unter der Freileitung nicht möglich war. Bei Durchgangsanschluß ist der Bodenleiter auf Mastbreite unterbrochen. Die durchgehende metallische Verbindung des Bodenleiters fand über die Eisenkonstruktion des Mastes statt. Die beiden an einem Mast endenden Bodenleiter sind an zwei verschiedenen Mastfüßen angeschraubt.

Der Spannung des betroffenen Mastes von rd. 1 kV gegen die Bezugs Erde entspricht in 1 m Abstand eine Spannung von etwa 0,5 kV. Zur weiteren Herabsetzung dieser Span-

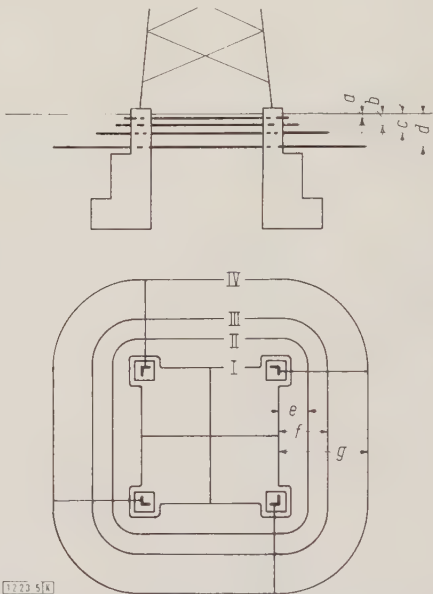


Bild 5. Anordnung der Potential-Steuerringe um Freileitungsmaste mit geteilten Fundamenten. Innerhalb der Maststiele liegen die Steuerbänder in Kreuzform 0,15 m tief.

Anordnung	Abmessungen in Metern						
	a	b	c	d	e	f	g
I, 1 Ring	0,15	—	—	—	—	—	—
II, 2 Ringe	0,15	0,2	—	—	0,7	—	—
III, 3 Ringe	0,15	0,2	0,3	—	0,5	1,0	—
IV, 4 Ringe	0,15	0,2	0,3	0,7	0,5	1,0	2,0

nungen wurden um die 93 Maste verzinkte Flacheisenbänder von (30 × 5) bzw. (25 × 4) mm² verlegt, die das Spannungsgefälle auf ausreichend niedrige Werte abbauen. Die Anordnung und Abmessungen der Steuerringe sind in Bild 4 und 5 dargestellt.

Nur einen Steuerring erhielten Maste, die auf keinem begangenen Gelände stehen und deren Berührung somit unwahrscheinlich ist. Maste an Wegen und Straßen, bei denen eine Berührung nicht ausgeschlossen scheint, ein direktes Daraufzugehen auf den Mast jedoch nicht erwartet wird, erhielten zwei, Maste auf bewohnten Grundstücken und viel begangenen Plätzen drei oder sogar vier Steuerringe.

Nach den Messungen ergaben sich mit Blitzseil und Bodenleiter, abhängig von der Zahl der Steuerringe, im Durchschnitt etwa die folgenden, auf 5 kA umgerechneten, Berührungsspannungen:

Zahl der Steuerringe	0	1	2	3	4
Anteil der Maste in %	0	12	51	23	14
Berührungsspannung in Volt kleiner als	550	300	150	100	90

Bei Masten mit Steuerringen können die Schrittspannungen jedoch höhere Werte erreichen. Außer der Verlegung von Bodenleitern und Potentialsteuerringen wurde noch eine Reihe anderer Maßnahmen vorsichtshalber durchgeführt. Dazu gehören die Isolierung von Drahtzäunen und eisernen Geländern, der Einbau von Isolierstücken in Rohrleitungen, die dicht an den Masten vorbeilaufen, die Potentialsteuerung von Tankanlagen und von Pumpen, von Wohnlauben, die in unmittelbarer Nähe von Masten stehen, die Aufschüttung von grobem Kies und dergleichen mehr.

Die folgenden Bilder bringen einige Ausführungsbeispiele. Der Flußkreuzungs-Abspannmast in Bild 6 steht direkt neben einer Böschung, so daß eine einwandfreie

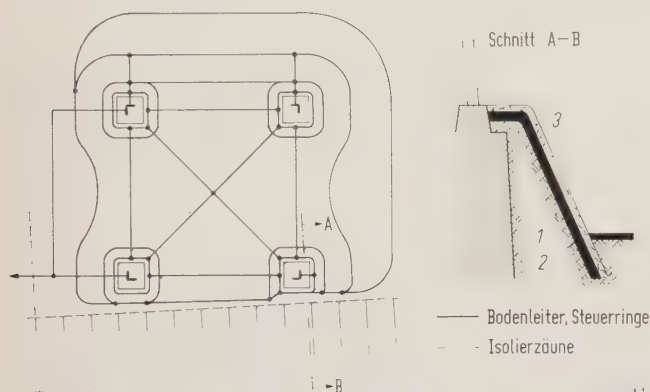


Bild 6. Potentialsteuerung eines Flußkreuzungs-Abspannmastes an einer Böschung.

1 Sandböschung 2 Schotter 3 Steinwand

Potentialsteuerung mit Eisenbändern schwer zu verwirklichen war. Die Böschung wurde durch Schotter nach außen isoliert. Bild 7 zeigt einen Tragmast dicht an der bewohnten Steinlaube des Nachbargrundstückes. Mit Rücksicht auf den Kostenaufwand wurde davon Abstand genommen, das Haus in die Potentialsteuerung einzubeziehen. Da bei einem Mast ohne Steuerringe schnell ein starker Spannungsabfall entsteht, wurden zwischen Laube und Mast keine Steuerringe verlegt. Auf diese Weise wird das Potential bis zum Haus entsprechend abgebaut. Das Betreten der kritischen Zone zwischen Wohnlaube und Mast wurde durch einen Isolierzäun verhindert. Die neben dem Mast aufgestellte Pumpe ist in die Potentialsteuerung einbezogen worden.

Der Mast in Bild 8 steht in einem Kleingartengelände. Sowohl der Hauptstrang als auch der Stichabzweig der Wasserleitung erhielten Isolierstücke. Die äußere Wasserzapfstelle des Grundstückes Nr. 255 wurde mit einem Steuerring versehen und dieser mit der Potentialsteuerung des Mastes verbunden. Auch die äußere Wasserzapfstelle des Grundstückes Nr. 84 bekam einen Steuerring und das Wasserleitungsrohr ein Isolierstück, damit eine Potentialverschleppung in das Haus hinein verhindert wird. In diesem befindet sich eine Pumpe, deren Antriebsmotor aus einem 220-V-Drehstrom-Freileitungsnetz gespeist wird. Für die erforderliche Schutzterdung ist praktisch nur das unterhalb des Kellers liegende Saugrohr der Pumpe maßgebend.

Bild 9 zeigt einen Straßenkreuzungsmast, der auf einer Rasenfläche vor einer Tankstelle steht. Die Wasserzapfstelle wurde in die Potentialsteuerung des Mastes einbezogen. Eine Verschleppung des Mastpotentials durch die vorbeiführende

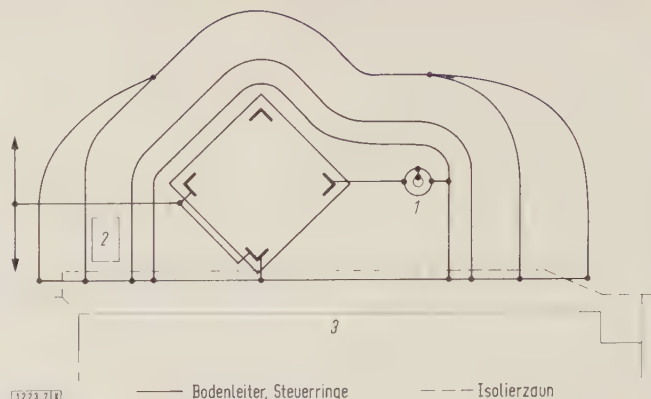


Bild 7. Potentialsteuerung eines Tragmastes neben einer gemauerten Laube.

1 Pumpe 2 Dunggube 3 Laube

Wasserleitung ist dadurch verhindert worden, daß in hinreichender Entfernung vom Mast Isolierrohrstücke eingesetzt wurden. Bei den Entwässerungs- und Benzinleitungen erübrigen sich derartige Maßnahmen, da sie von dem Mast genügend Abstand haben.

Schutz des 110-kV-Netzes

Mit der Einführung der Sternpunktterdung wurde das Netz zu einem Vierleitersystem. Die Schutzzeineinrichtungen mußten daher an die neue Betriebsform angepaßt werden. Alle Distanzrelais benötigten nunmehr im Minimum die dreipolige Anregung. Sie wurden jedoch nur mit einem Meßglied ausgerüstet, das jeweils auf den kranken Leiter geschaltet wird. Um Kurzschlüsse über Erde von Kurzschlüssen ohne Erdberührung unterscheiden zu können, mußten auch Überstromrelais für Nullstrom eingebaut werden.

Bild 10 zeigt im Prinzip die Schutzanlage eines Ausschnittes des 110-kV-Netzes. Wie bereits erwähnt, wurde mit Rücksicht auf die Schritt- und Berührungsspannungen eine Gesamtausschaltzeit von 0,2 s geplant. Dabei wurden noch Schaltereigenzeiten von 80 bis 100 ms zugrunde gelegt, Werte, die heute bereits auf die Hälfte vermindert werden können.

Bei den Freileitungen haben beide Seiten Impedanzschutz mit Überstrom- und Unterimpedanz-Anregung, dessen Kommandozeit 100 ms beträgt. Die Unterimpedanzanregung hat den Vorzug, daß ein Feststellen des Kurzschluß-

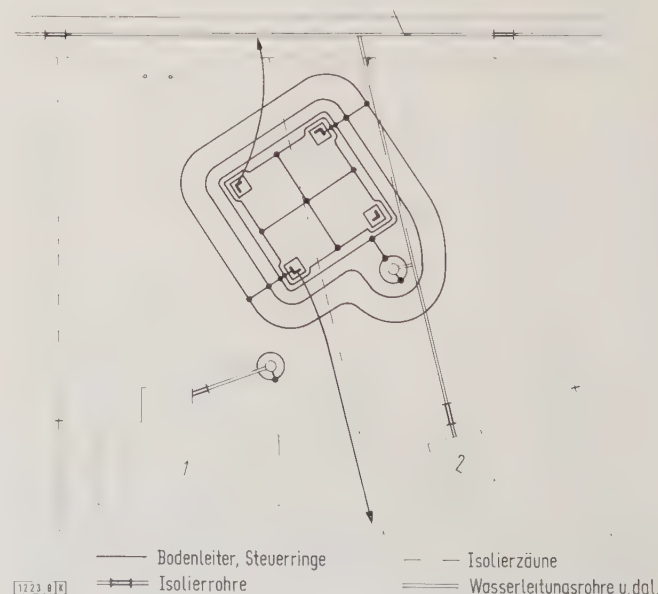


Bild 8. Potentialsteuerung eines Abspannmastes in einem Gelände mit Kleingärten.

1 Wohnlaube Nr. 84 2 Wohnlaube Nr. 255

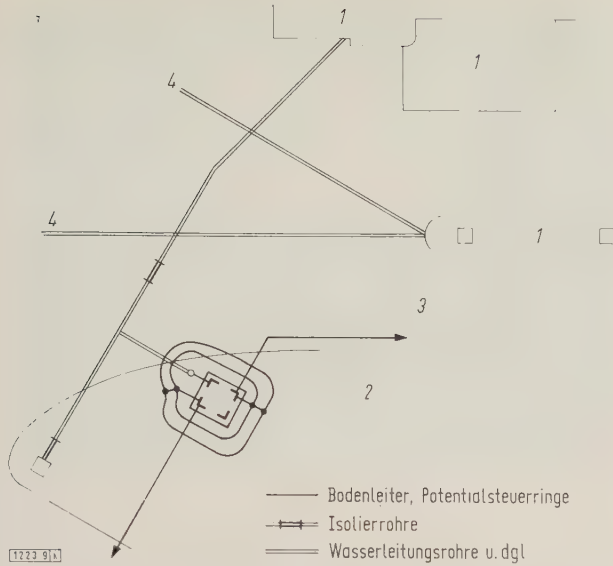


Bild 9. Potentialsteuerung eines Straßenkreuzungs-Abspannmastes neben einer Tankstelle.

1 Tankstelle 2 Rasen 3 Asphalt 4 Benzinleitungsrohre

zustandes und damit eine Anregung auch dann noch stattfindet, wenn der Kurzschlußstrom kleiner als der maximale Betriebsstrom ist. Der Distanzschutz erfaßt bei zweiseitiger Speisung lediglich Kurzschlüsse auf etwa 70 % der Übertragungsstrecke mit Schnellzeit, die restlichen 30 % werden mit Staffelzeit abgeschaltet. Wegen des Lichtbogeneinflusses, der bei den kurzen Freileitungen der Bewag fast einen größeren Widerstand hat als die Leitung selbst, wurden alle Freileitungen zusätzlich mit einem einpoligen Differentialschutz ausgerüstet. Seine Kommandozeit ist rd. 20 bis 50 ms. Dieser arbeitet nur bei Erdkurzschlüssen, d. h. dann, wenn Berührungs- und Schrittspannungen auftreten können. Der Distanzschutz erfaßt mehrpolige Fehler auf den Leitungen sowie Sammelschienenkurzschlüsse. Außerdem ist er Reserveschutz für den Differentialschutz beim Defekt der Hilfsleitungen.

An der zuletzt erstellten Freileitung von Spandau nach Kraftwerk Reuter sind einpolige Kurzunterbrechungen eingebaut. Die Pausenzeit ist nur auf 0,4 s ausgedehnt, um die Netzstabilität nicht zu gefährden. Bei Speiseleitungen von beträchtlicher Länge können durch den Kapazitätsstrom der gesunden Leiter zum kranken Leiter kapazitive Lichtbögen aufrechterhalten werden, die das Bestreben haben, die Entionisierungszeit an der Fehlerstelle zu verlängern. Bei längerer Pausenzeit wird jedoch die Netzstabilität eingebüßt.

Die Kabel erhielten ebenfalls Impedanzschutz mit Überstrom- und Unterimpedanzanregung. Damit dieser unabhängig vom Fehlerort stets beiderseitig mit Schnellzeit auslöst, wurde zusätzlich die sogenannte Mitnahmeschaltung eingebaut.

Bei einem Kabelkurzschluß wird in fast allen Fällen eines der beiden Distanzrelais des betreffenden Kabels mit Kurzzeit ansprechen. Der Auslöseimpuls wird dann über Hilfsleitungen zur Gegenseite übertragen und bewirkt dort ebenfalls sofortige Auslösung. Zur Sicherheit wird dabei noch die Anregung abgefragt. In den Kabelabzweigen des Kraftwerkes Reuter sind Überspannungsrelais eingebaut, die beim Spannungsanstieg über 125 kV die Kabel abschalten. Dieser kann z. B. durch Selbsterregung der Generatoren bei kapazitiver Belastung durch unbelastete 110-kV-Kabel auftreten.

Die 110/30-kV-Transformatoren haben Buchholz- und Thermoschutz, der dem Differentialschutz überlagert ist. Bei 30-kV-Sammelschienen-Kurzschlüssen werden die Transformatoren durch Impedanzrelais abgeschaltet. Mit Rücksicht auf die Koordinierung der Staffelzeiten wurde auf der 30-kV-Seite Richtungsabhängigkeit vorgesehen. Bei 110-kV-

Sammelschienen-Kurzschlüssen werden die Transformatoren durch Impedanzrelais mit Überstrom- und Unterimpedanzanregung in dreipoliger Ausführung abgeschaltet. Die kleinste Auslösezeit liegt zwischen 0,6 und 1,1 s und ist über die Auslösezeit des Schutzes der Freileitungen und Kabel gestaffelt.

Induktive Beeinflussung von Schwachstromkabeln

Im Rahmen des umfangreichen Meßprogramms wurden auch die Längsspannungen festgestellt, die in den Fernmeldekabeln durch den Erdkurzschlußstrom der Hochspannungsfreileitungen und Kabel induziert werden. Ihre Größe hängt von der Stromstärke in der Starkstromleitung und vom Grad der magnetischen Verkettung der Starkstromleitung mit dem Fernmeldekabel ab. Letztere ist ihrerseits durch den gegenseitigen Abstand der beiden Leitungen, die Länge der Parallelführung und durch die Bauart des Fernmeldekabels bestimmt.

Zu den ohnehin kurzen Freileitungen laufen die Fernmeldekabel mit großem Abstand und nur auf kleiner Strecke parallel. Die induzierten Längsspannungen erreichen daher, bezogen auf einen Erdkurzschlußstrom von 5 kA, nur Werte, die wesentlich unter den nach CCI¹⁾-Vorschrift zugelassenen Längsspannungen von 430 V bleiben. Ungünstiger sind die Verhältnisse bei Fernmeldekabeln, die im gleichen Graben mit den 110-kV-Kabeln liegen. Wegen des geringen Abstandes und der großen Beeinflussungslänge bis zu fast 20 km ergab ein Erdkurzschlußstrom von 5 kA Spannungen bis zu 1500 V, die an den Aderenden auftraten. Da der Fehler auf dem Starkstromkabel zweiseitig gespeist wird, sind jedoch nur 2,5 kA wirksam. Ferner kam noch zustatten, daß wegen der Reduktionswirkung der metallischen Umhüllungen der Hochspannungskabel nur ein geringer Teil des Erdkurzschlußstromes über Erde fließt. Ebenfalls reduzierend wirken die Bleimäntel und Bewehrungen der Fernmeldekabel. Die Mantelschutzfaktoren betragen für die Verhältnisse in diesem 110-kV-Netz $r_K = 0,25$ bis 0,8. Außerdem setzen auch andere, parallel zu den Fernmeldekabeln liegende Leiter, wie Eisenrohre, Schienen, andere Kabel usw., die im Beeinflussungsbereich des Starkstromkabels liegen, die induzierte

1) CCI = Comité Consultatif International.

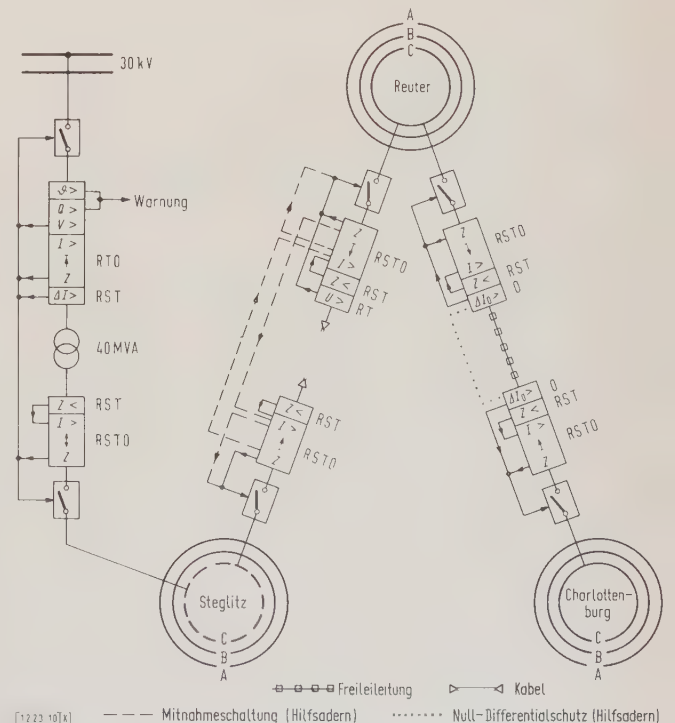


Bild 10. Schutzvorrichtungen eines Ausschnitts des 110-kV-Netzes von West-Berlin in schematischer Darstellung.

Längsspannung herab. Die Kompensationsfaktoren schwanken zwischen $r_K = 0,5$ bis $0,8$ im stark bebauten Großstadtbereich und steigen in Außenbezirken bis 1 an.

Um eine Gefährdung der Isolation der Fernsprechanlage und von Personen, die diese benutzen, durch das Auftreten solcher Spannungen zwischen Adern und Erde zu vermeiden, hat man sämtliche Adernpaare der mit den 110-kV-Kabeln parallel geführten Schwachstromkabel beiderseits gemäß VDE 0675/9. 57 mit Überspannungsableitern beschaltet. Jeder Ableiter hat drei Elektroden für den Anschluß der Adernpaare und der Erde. Die Ansprech-Gleichspannung liegt bei 230 V. Die Hilfsleitungen für die Mitnahmeschaltung des Kabelschutzes, der ja gerade im Störfall sicher arbeiten muß, erhielten Überspannungsableiter, denen Kondensatoren vorgeschaltet sind.

Betriebserfahrungen mit dem starr geerdeten 110-kV-Netz

Wie eingangs schon betont wurde, sind die Betriebserfahrungen mit dem starr geerdeten 110-kV-Netz zwar zeitlich kurz, aber gut, denn es traten glücklicherweise kaum Störungen auf. Bei der Insellage der Berliner Stromversorgung ist das naturgemäß von besonderem Wert.

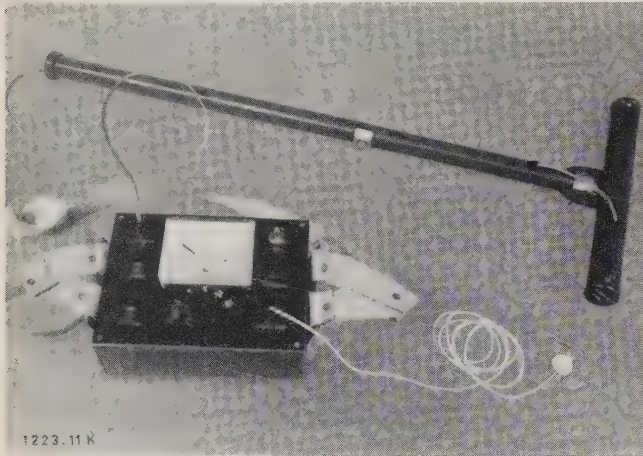


Bild 11. Gerät zur Kontrolle des Bodenleiters im 110-kV-Netz mit Suchspule und Kopfhörer.

Bodenleiterunterbrechungen

Von Beginn der Sternpunktterdung des Netzes an hat man besonderes Augenmerk den Freileitungen zugewendet, denn hier sind in erster Linie Fehler und damit gegebenenfalls zu hohe Schritt- und Berührungsspannungen zu befürchten. Die Freileitungsisolatoren wurden in Abständen von höchstens einem halben Jahr gemäß VDE 0141, § 29, sorgfältig kontrolliert. Vor Einführung der Sternpunktterdung waren bereits alle Klemmenverbindungen zwischen Mast- und Blitzseil auf gute, einwandfreie Qualität überprüft. Außerdem hat man alle großen Baustellen der Stadt, die in der Nähe dieser Freileitungen lagen, besonders überwacht, um eine Bodenleiterunterbrechung durch Bagger und andere Straßenbaumaschinen zu verhindern, denn nur dann, wenn der Bodenleiter durchverbunden ist, tritt bei einem Erdkurzschluß die erwünschte Spannungsminderung am Mast-erder ein. Man muß deshalb den Zustand des Bodenleiters in angemessenen Zeiträumen, etwa alle 6 Monate, auf Beschädigung und Unterbrechung überprüfen.

Im Elektrotechnischen Laboratorium der Bewag wurde ein Verfahren zur Ortung von Unterbrechungen im Bodenleiter entwickelt. Als es im Jahre 1959 nach fast zweijährigem Betrieb mit geerdetem Sternpunkt zum ersten Male angewendet wurde, wurden trotz der vorher erwähnten Kontrollmaßnahmen überraschenderweise neun Bodenleiterunterbrechungen festgestellt. Die Messung kann bei in Betrieb befindlicher Leitung und ohne den Bodenleiter auftrennen zu müssen, durchgeführt werden.



Bild 12. Frontplatte des Geräts in Bild 11.

Über Umbauwandler, die in einen Mast des zu untersuchenden Mastfeldes eingebaut wurden, wird dem Bodenleiter Strom aufgedrückt. Eine Einspeisung an anderer Stelle, etwa in Feldmitte, bringt meßtechnisch keine Vorteile, sondern Nachteile durch zusätzliche Erdarbeiten beim Freilegen des Bodenleiters. Die Umbauwandler werden von einem 1010-Hz-Sender gespeist. Es wird mit einem Bodenleiterstrom von rd. 250 mA gearbeitet, gemessen in etwa 10 m Entfernung von der Speisequelle. Bei diesem Bodenleiterstrom werden auf der Primärseite des Wandlers, abhängig von den Schleifenabmessungen und der Bodenbeschaffenheit, ein Strom von etwa 2 bis 3 A und eine Spannung von rd. 20 bis 40 V benötigt. Der Eingang des Senders (220 V, 50 Hz) wird von einem transportablen Stromerzeuger mit Benzinmotor von 2 bis 3 kW Leistung versorgt.

In einer Suchspule oder einem Zangenanleger wird durch das magnetische Feld des von einem Strom mit einer Frequenz von 1010 Hz durchflossenen Bodenleiters eine Spannung erzeugt, die durch drei Transistor-NF-Stufen verstärkt wird. Mit der Suchspule kann man im Abstand von 60 cm vom Bodenleiter (Verlegungstiefe) Bodenleiterströme von 3 bis 300 mA, mit einem Zangenanleger solche von 30 mA bis 3 A messen. Die Anzeige geschieht optisch in einem Multavi-Instrument und akustisch in einem Kopfhörer mit einer Impedanz von 1 kΩ. Als Stromquelle des Verstärkers dient eine 4,5-V-Taschenlampenbatterie. Die Stromaufnahme des Gerätes beträgt 20 mA. Kopfhörer und Meßgerät müssen zur gleichen Zeit angeschlossen werden. Die Verwendung des Kopfhörers erleichtert die Ortung wesentlich (Bild 11, 12, 13). Die Größe des Stromes in einem bestimmten Punkt des Bodenleiters wird mit der Spule dann richtig erfaßt, wenn ihre waagerechte örtliche Lage so lange verändert wird, bis sich ein maximaler Ausschlag im Anzeigegerät ergibt.

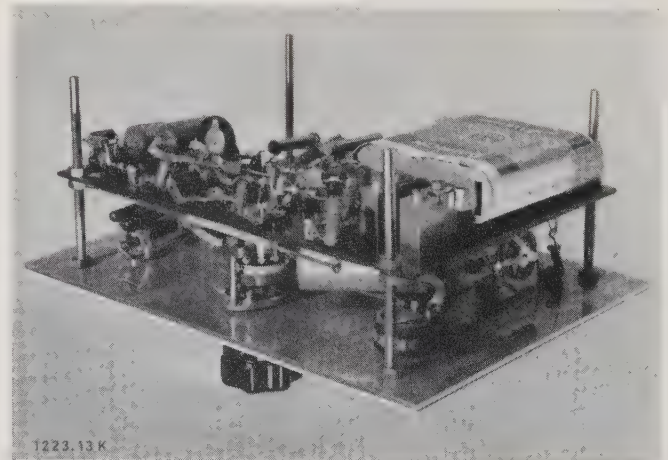


Bild 13. Innenaufbau des Geräts in Bild 11.

Für alle Felder zwischen den Masten der in Betrieb befindlichen Freileitungen wurden für den durchverbundenen Bodenleiter sogenannte „Normkurven“ aufgenommen. Sie zeigen die längs des Bodenleiters gemessenen Stromwerte. Diese Normkurven sind die Bezugskurven für alle nachfolgenden Wiederholungsmessungen. Grundsätzlich sind dabei zwei in ihrem Verlauf stark voneinander abweichende Kurven zu erwarten:

1. Bei leitender Durchverbindung des Bodenleiters (Bild 14) wird in dem zu untersuchenden Feld zwischen zwei Masten im Bodenleiter ein kontinuierlich von der Stromquelle etwa exponentiell abfallender Verlauf der Kurve gemessen. In den Nachbarmasten ergeben sich von Mast zu Mast immer kleiner werdende Ströme. An den Nachbarmasten treten infolge der Wirksamkeit der Mast-erder Sprungstellen auf.

2. Bei Unterbrechung des Bodenleiters (Bild 14) fällt der Strom von der Stromquelle zur Unterbrechungsstelle von 100 % auf nahezu 0 % ab. Hinter der Unterbrechungsstelle steigt der Strom unwesentlich über 0 % an. Die Unterbrechung markiert sich eindeutig. In allen Masten und in allen Mastfeldern hinter der Unterbrechung liegt der Strom bei etwa 0 %. Vor der Unterbrechungsstelle ist der gleiche Kurvenverlauf und sind die gleichen Sprungstellen vorhanden wie unter 1.

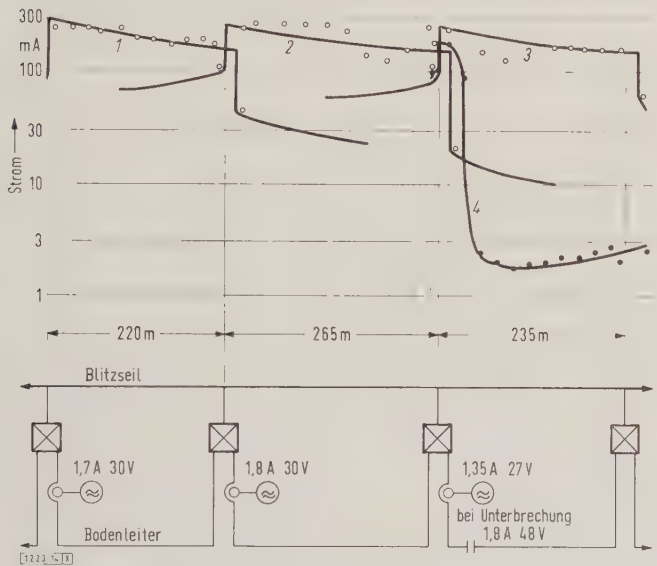


Bild 14. Ergebnisse der Prüfung des Bodenleiters einer 110-kV-Freileitung auf Unterbrechung in drei Feldern zwischen den Masten.
1, 2, 3 Bodenleiter durchverbunden 4 Bodenleiter unterbrochen

Bei der Fehlersuche wird man zweckmäßigerweise erst Vormessungen durchführen.

Die Versuche haben gezeigt, daß infolge von verschieden großen Mastschleifen und unterschiedlicher Bodenleitfähigkeit Primärstrom und Primärspannung von Schleife zu Schleife erheblich voneinander abweichen können. Diese „Kennwerte“ müssen für jede Schleife einzeln festgestellt werden. Bei Wiederholungsmessungen gestatten sie nur Rückschlüsse auf den Zustand der gesamten Schleife, nicht auf den Bodenleiter allein. Eine Unterbrechung der Mastschleife, die z. B. auch an der Klemmstelle zwischen Mast und Blitzseil infolge Rostbildung eintreten kann, hat ebenso wie eine Bodenleiterunterbrechung von den Kennwerten unterschiedliche Werte zur Folge.

Eine zweite Vormessung wird mittels Stromzange und Verstärker durchgeführt. Die Größe des Bodenleiterstromes wird direkt an den einzelnen Masten gemessen. Das Kennzeichen einer Bodenleiterunterbrechung bei dieser Meßmethode ist, daß der hinter einer Unterbrechung befindliche erste Mast und die nachfolgenden weiteren Maste nahezu keinen Bodenleiterstrom führen. Liegt keine Unterbrechung

vor, so fließt zwischen diesen Masten im Bodenleiter ein Strom, dessen Größe abhängig ist von der Querableitung des Stromes längs des Bodenleiters und dem Teilstrom, der über die Mast-erder abgeführt wird. Der Entscheid „Unterbrechung“ ist nur dann eindeutig zu treffen, wenn verhindert ist, daß eine ungewollte, im Erdreich liegende leitende Verbindung zwischen Bodenleiter und Steuerring besteht. Diese Vormessung bietet den Vorteil, daß durch die Strommessung an den Masten der Schleifenzustand festgestellt werden kann, ohne die gesamte Bodenleitertrasse mit der Spule ausmessen zu müssen.

Die erwähnten neun Unterbrechungen wurden mit Hilfe der Suchspule auf rd. 1 m genau geortet. Davon waren acht eindeutig durch äußere Gewaltanwendung (Baumaschinen, Bauarbeiten) entstanden. Die Unterbrechungen befanden sich meist nicht direkt an der Baustelle, sondern an den nächstgelegenen Schweißstellen. Die Oberfläche des Bodenleiters befand sich an der freigelegten Stelle in einem vollkommen einwandfreien Zustand. Nirgends war Rostbildung feststellbar. Auch Korrosionsschutz und Densobinde haben sich an den Schweißstellen gut bewährt. In einem Falle wurde eine Unterbrechung vorgetäuscht. Der Bodenleiter war durch ein Eisenrohr gezogen, das mit diesem und einer metallenen Brückenkonstruktion direkte Verbindung hatte. Der Strom trat aus dem Bodenleiter über das Eisenrohr auf Brückenkonstruktion von sehr viel kleinerem Widerstand über und verzweigte sich in viele kleine Teilströme, die praktisch nicht mehr meßbar waren. Hinter dieser Verbindungsstelle führte der Bodenleiter nahezu keinen Strom mehr, so daß auf eine Unterbrechung geschlossen werden mußte. Als Abhilfe wurde hier statt des Bodenleiters ein isoliertes Niederspannungskabel in das Eisenrohr eingezogen.

Die ein halbes Jahr später durchgeführte Kontrollmessung ergab nur eine Bodenleiterunterbrechung, die durch Erdarbeiten der Wasserwerke verursacht worden ist. Ferner war eine Verbindung zwischen Mast und Blitzseil nicht einwandfrei. Die letzte Prüfung wurde im März 1961 vorgenommen. Außer vier schlechten Verbindungen zwischen Mast und Blitzseil zeigten sich keine Fehler. Die Bodenleiter-Stromkurve weist an solchen Masten Sprünge mit kleinerem Wert gegenüber der „Normkurve“ auf.

Aus den bisher gewonnenen Erfahrungen ergaben sich folgende Forderungen für neu zu erstellende Bodenleiterstrecken:

1. Bodenleiter und Potentialstüerringe werden an den Stoßstellen überlappt geschweißt und vorher verschraubt. Früher wurden die Stahlschienen nur stumpf geschweißt.
2. Der Bodenleiter wird an die Maste nur im Durchgang angeschlossen; Stichverbindungen werden nicht mehr erstellt. Daher wurde auf ihre Besonderheiten bei der Feststellung einer Bodenleiterunterbrechung nicht mehr eingegangen.
3. Um eine gute Verbindung des Bodenleiters mit dem Mast zu erhalten, werden nach wie vor die Anschlußstellen am Mast verzinkt.
4. Der Bodenleiter wird am Mast rd. 0,5 m über dem Erdboden angeschlossen; er erhält an diesem Stück eine Abkröpfung zum leichteren Einbau des Umbauwandlers.
5. Zur Einführung einer Bodenleiter-Überwachungseinrichtung wird ein zweiadriges farbiges Kunststoffkabel mitgeführt, das mit dem Bodenleiter verlegt und an diesem mit farbigen Kunststoffbändern befestigt wird. Sie werden mit dem Aufdruck „Bewag“ auffällig gekennzeichnet, um vor unbedachter Unterbrechung zu warnen.
6. Bei Brückenüberquerungen wird statt der Stahlschiene ein isoliertes Niederspannungskabel Bodenleiter verwendet.
7. Um Berührungen des Bodenleiters mit Steuerringen zu verhindern und irreführende Meßergebnisse in diesem Bereich zu vermeiden, wird der Bodenleiter im Bereich der Steuerringe mit Abdecksteinen abgeschirmt.

8. Das Erdseil muß außer mit der üblichen Erdseil-Anschlußklemme mittels einer Seilschlaufe so mit den Masten verbunden werden, daß ein dauernder niederohmiger Stromübergang vom Erdseil zum Mast gewährleistet ist. Das ist wichtig für Kontrollmessungen.

Andere Fehler im 110-kV-Netz

Bevor auf die übrigen Fehler in diesem 110-kV-Netz eingegangen wird, seien einige Angaben über die Freileitungen und Kabel sowie den Isolationsgrad der Anlagen gemacht. Die Freileitungen haben ein Mastbild in Tannenbaumform und ein Blitzseil von 50 mm² Stahl. Für die jetzt gebaute Strecke Spandau-Reuter wurde Stahl-Aluminium 42,9/73,3 mm² verwendet. Die alten Leitungen sind

Kriege, die übrigen nach 1945 errichtet. Nur drei Anlagen entsprechen teilweise, und zwar hinsichtlich der Mindestabstände in Luft zwischen unter Spannung stehenden Teilen der Reihe 110 N. Zwei Anlagen genügen auch noch nicht teilweise der Reihe 110 NE bzw. Reihe 110 S. Ähnlich liegen die Verhältnisse hinsichtlich der Schutzabstände. Nur die Mindesthöhe von unter Spannung stehenden Teilen über Gängen wird in allen Anlagen den neuesten Vorschriften für Reihe 110 gerecht.

In dem neun Jahre währenden Inselbetrieb traten in dem 110-kV-Netz 6 Freileitungs- und 26 Anlagenfehler auf (Tafel 2). Davon entfallen auf die Zeit nach Einführung der Sternpunktterdung drei Freileitungs- und sechs Anlagenfehler. Darunter waren ein Erdkurzschluß durch Berühren

Tafel 1. Mindestabstände in Luft der 110-kV-Anlagen von West-Berlin nach VDE 0101.

nach VDE 0101/5.43			nach Entwurf VDE 0101/...58				nach VDE 0101/7.60			
	Innenraum-Anlagen	Freiluft-Anlagen	Innenraum-Anlagen		Freiluft-Anlagen		Innenraum-Anlagen		Freiluft-Anlagen	
Reihe	R 110 ¹⁾	R 110 ¹⁾	R 110	R 110 E	R 110	R 110 E	R 110 N	R 110 NE	R 110 S	R 110 SE
Abstand	800 mm	1000 mm	800 mm	720 mm	1000 mm	850 mm	1100 mm	950 mm	950 mm	800 mm
Anlagen A bis G, die zum Teil nach den jeweiligen Reihenspannungen Mindestabstände aufweisen										
Anlage	A, B, C, D, E	F ²⁾	G ²⁾	A, B, C, D, E	F ²⁾	A	G ²⁾	A, B, G ²⁾	A, B, D, G ²⁾	A, B, D, G ²⁾
Reihe	R 110 ¹⁾	nicht festgestellt	R 110 ¹⁾	R 110, R 110 SE	nicht festgestellt	R 110 E	R 110	R 110 N	R 110 NE	R 110 S

1) Alte Bauweise. 2) Freiluftanlage.

vorwiegend mit 7-gliedrigen Doppelketten aus Kappenisolatoren, die nach dem Kriege gebauten Trassen mit 2-fach Langstabisolatoren mit 14 bzw. 22 Rillen ausgerüstet.

Alle Freileitungen sind am Anfang und Ende, die Leitung Spandau-Reuter auch an der Havelkreuzung, die mit Rücksicht auf den Flugverkehr verkabelt werden mußte, mit Überspannungsableitern versehen. Eine Ausnahme bilden die Freileitungseinführungen in Moabit. Diese 110-kV-Anlage wird in Kürze neu erstellt; dabei werden dann die Ableiter eingebaut.

An Olkabeln wurden sowohl Drei- als auch Ein-Leiter-Typen und diese nebeneinander oder im Dreieck mit gegenseitiger Berührung verlegt. Die Dicke der Isolierung schwankt bei dem am häufigsten verwendeten Querschnitt 150 mm² Cu von 9,5 bis 11,0 mm.

Tafel 1 zeigt eine Übersicht der Mindestabstände in Luft, wie sie die VDE-Vorschriften 0101 fordern. Es sind gegenübergestellt die Bestimmungen vom Mai 1943, des Entwurfes 1958 und der jetzt gültigen Fassung vom Juli 1960. Die Anlagen A, B und F wurden bereits vor dem

einer Freileitung mit einer ausgefahrenen Eisenleiter bei Malerarbeiten und ein dreipoliger Sammelschienenkurzschluß durch einen Schaltfehler. Es verbleiben also für die 3½ Jahre Netzbetrieb mit Sternpunktterdung zwei Freileitungs- und fünf Anlagenfehler, gegenüber 2 Freileitungs- und 20 Anlagenfehlern im Netz mit freiem Sternpunkt für einen Zeitraum von 5½ Jahren. Ein Freileitungsfehler, der durch Lösen einer Abspannklemme am Mast entstand, wurde bereits in Abzug gebracht. Bezogen auf den gleichen Zeitraum ist demnach die Zahl der Fehler um 50 % zurückgegangen. Dabei ist die Erweiterung des 110-kV-Netzes noch nicht berücksichtigt.

Die drei Schäden an den 110/30-kV-Abspannern im starr geerdeten Netz betrafen ausschließlich 30-kV-Wicklungen von Betriebsmitteln, die älter als 30 Jahre waren. Ein Fehler entstand durch Überspannungen beim Ausschalten einer 30-kV-Ladestrom-Kompensationsdrosselspule. Die daraufhin eingebauten Überspannungsableiter, die im Dreieck an den Kompensationsdrosselspulen angeordnet wurden, haben beim Abschalten der Spulen, die verhältnismäßig oft eingesetzt werden müssen, in 96 % der Fälle angesprochen.

Bei der Beurteilung der Gefährdungsmöglichkeiten darf die äußerst geringe Wahrscheinlichkeit nicht außer acht gelassen werden, daß ein Mensch innerhalb der sehr kurzen Abschaltzeiten den fehlerhaften Mast berührt oder einen Schritt an der ungünstigsten Stelle tut. Unterstellt man jährlich einen Freileitungsfehler an den rd. 100 Masten und nimmt man weiterhin an, daß 10 000 Menschen zu verschiedenen Zeiten sich einmal im Jahr 10 min im Bereich eines Mastes bewegen oder ihn berühren, so ist bei einer Gesamtausschaltzeit von 0,2 s die Wahrscheinlichkeit, daß ein Mensch überhaupt in Gefahr geraten kann, etwa wie 1 : 50 000.

Übergang zur mittelbaren Erdung über strombegrenzende induktive Widerstände

Infolge der Steigerung der Kraftwerksleistung durch die Neuanlage Spandau um 200 MW, die direkt, also ohne galvanische Trennung, in das 110-kV-Netz eingespeist werden, und der Erhöhung der Netzumspannerleistung

Tafel 2. Fehler im 110-kV-Inselnetz von West-Berlin in den Jahren 1952 bis 1961.

Fehlerart und Fehlerort	Fehlerzahl	
	Sternpunkt frei	geerdet
einphasige Erdschlüsse	12	1
andere Fehler (Doppelerdschlüsse, Mehrfachfehler, Windungsschlüsse usw.)	11	8
insgesamt	23	9
Anteilmäßige Übersicht		
Freileitungen	3	3
Durchführungen	9	1
Wandler	6	1
Kathodenfallableiter	1	—
Transformatoren	4	3
Sammelschienen	—	1

(110/30 kV) überschreitet der Erdkurzschlußstrom den vorgesehenen Höchstwert von 5 kA. Die Verlegung von weiteren Steuerringen, mit denen man auch größere Mastspannungen beherrschen könnte, scheidet wegen der Kosten und der oft beschränkten Raumverhältnisse um die Maste aus.

Man muß daher strombegrenzende Widerstände einbauen und damit Ende 1961 zur mittelbaren Erdung des 110-kV-Netzsternpunktes übergehen. Die Entscheidung fiel auf Drosselspulen. Ohmsche Widerstände haben größere Verluste und müssen wegen des vorwiegend induktiven Charakters der Kurzschlußbahn höhere Widerstandswerte haben, wenn die gleiche Strombegrenzung erreicht werden soll.

Als Sternpunktdrosselspulen hat man Einheiten für 60 Ω und eine Belastbarkeit von 750 A während 5 s gewählt, um

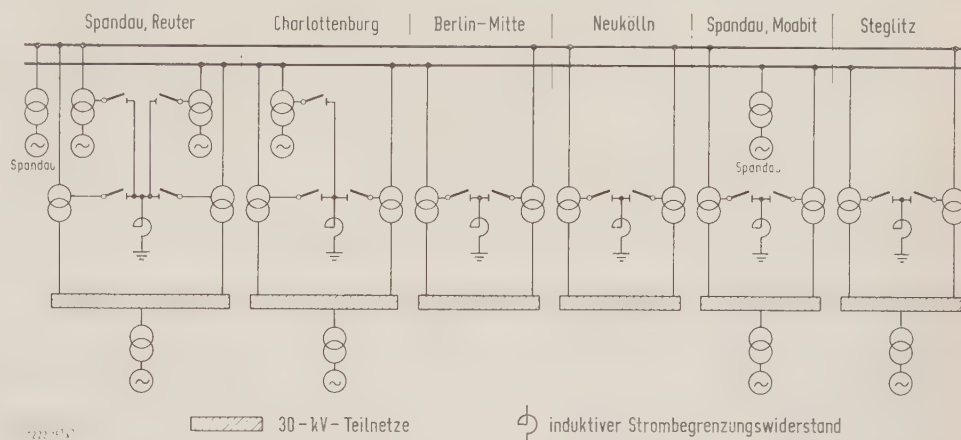
weiteres jeder Sternpunkt geerdet werden. Das schafft für den Schutz die günstigsten Bedingungen.

Die Blockeinheiten des neuen Kraftwerkes Spandau gehören elektrisch gesehen zu den Werken Reuter bzw. Moabit. Der Einbau einer Sternpunktdrosselspule kann daher eingespart werden.

Die Verbindungsleitungen vom Transformatorsternpunkt zum Trenner und von diesem zur Sternpunktdrosselspule wurden nach Reihe 60 isoliert. Für die Sternpunktrenner wurde mit Rücksicht auf die Lagerhaltung Reihe 110 gewählt, obwohl Reihe 60 genügen würde.

Die beiden 110-kV-Netze erhalten gemeinsame Sternpunktdrosselspulen. Der Schutz beider Netzteile muß als Einheit aufgefaßt und ausgelegt werden. Tritt in einem Netz

Bild 15. Prinzipschaltbild des 110-kV-Netzes von West-Berlin nach dem Stande von 1962 mit mittelbarer Erdung des Sternpunktes.



gegebenenfalls entstehenden Schutzversagern Rechnung zu tragen. Werden sechs Sternpunktdrosseln eingeschaltet, so ergeben sich für die resultierenden Nullimpedanzen der 110-kV-Netzteile je nach Fehlerort Werte von 40 bis 50 Ω je Leiter. Die Spulen selbst haben eine resultierende Nullimpedanz von 30 Ω je Leiter. Der Anteil der Nullimpedanzen von Transformatoren, Kabeln und Freileitungen ist also noch erheblich.

Das Verhältnis der Nullimpedanz zur Mitimpedanz, das heute wesentlich kleiner als 1 ist, wächst je nach der Netzkonstellations auf Werte von 5 bis 9 an. Bei einem Erdkurzschluß kann dann die betriebsfrequente Spannung der gesunden Leiter gegen Erde den 0,8-fachen Wert der verketteten Betriebsspannung überschreiten. Nach den VDE-Vorschriften müssen dann alle Geräte nach Reihe 110 isoliert werden. Nachdem man aus den bereits früher geschilderten Gründen die verminderte Isolation nicht angewendet hat, hat diese Bestimmung in diesem Fall keine Auswirkung. Da das Verhältnis der Null- zur Mitimpedanz unter dem Wert 10 bleibt, ist nach amerikanischen Untersuchungen damit zu rechnen, daß die transienten Überspannungen auch im nicht wirksam geerdeten Netz wesentlich kleiner sind als in Netzen mit freiem Sternpunkt oder Erdschlußlöschung.

Es sei noch kurz der Einfluß des Kabelnetzes auf die Größe des Erdkurzschlußstromes gestreift. Der induktiven Nullimpedanz der Kabel, Transformatoren und Sternpunktdrosselspulen ist die Kabelkapazität parallelgeschaltet. Da die Leitwerte der Nullglieder dieser Betriebsmittel zum Teil also entgegengesetztes Vorzeichen haben, wird der resultierende Nulleitwert mit der Vergrößerung des Kabelnetzes verkleinert, der Widerstand also erhöht. Diese Tatsache wirkt sich in einer nennenswerten Reduktion des Erdkurzschlußstromes aus.

Die Anordnung der Sternpunktdrosseln im Netz zeigt Bild 15. Um sie besser darstellen zu können, wurden Kabel und Freileitungen weggelassen. Die Teilnetzkompositionen sind gegenüber Bild 1 variiert.

Um den Erdkurzschlußstrom klein zu halten, hat man bei der unmittelbaren Sternpunktterdung nur einen Transformator in jeder 110-kV-Anlage und zwar jenen mit der kleinsten Leistung über einen fernbetätigten Trenner geerdet. Nach Einführen der mittelbaren Erdung kann bis auf

ein Erdkurzschluß auf, so nehmen auch die Sternpunkte des gesunden Netzes Spannungen an, die Überströme hervorrufen und die Schutzrelais anregen können. Sind beide Netze asynchron, so wird vom gesunden System nur das Nullsystem in Mitleidenschaft gezogen. Werden beide Netzgruppen z. B. über die 30-kV-Seite der 110-kV-Umspanner gekuppelt, so wirken sich Fehler in dem einen Netz auch im Mit- und Gegensystem des anderen aus, gleichgültig, ob gemeinsame oder getrennte Sternpunktdrosseln vorhanden sind. Da die Distanzrelais den Widerstand der Kurzschlußschleife vom Einbauort zur Fehlerstelle messen und entsprechend gestaffelt eingestellt werden, sind nach den Untersuchungen im Netz der Bewag keine Fehlauflösungen von Betriebsmitteln zu erwarten.

Zusammenfassung

Die Bewag hat im Jahre 1957 den Sternpunkt ihres 110-kV-Netzes starr geerdet. Das geschah nach eingehenden theoretischen Überlegungen und Berechnungen, entsprechenden Nieder- und Hochstromversuchen, nach Verlegung eines „Bodenleiters“ und von Potentialsteuerringen sowie Durchführung verschiedener Vorsichtsmaßnahmen. In der dreieinhalbjährigen Betriebszeit traten 9 „Bodenleiter“-Unterbrechungen auf, die durch ein besonders dafür entwickeltes Meßverfahren geortet wurden. Die Zahl der übrigen Fehler ist gegenüber dem Betrieb mit freiem Sternpunkt um etwa 50 % zurückgegangen. Ende 1961 findet wegen Erhöhung der Leistung der Kraftwerke und der 110/30-kV-Umspanner der Übergang zur mittelbaren Erdung durch Einbau von Sternpunktdrosselspulen statt.

Schrifttum

- [1] Baatz, H.: Überspannungsschutz. Elektr.-Wirtsch. Bd. 59 (1960) S. 58–62.
- [2] Erche, M.: Untersuchung über die Entstehung hoher Erdschluß-Überspannungen in gelöschten oder mit freiem Sternpunkt betriebenen Hochspannungsnetzen. VDE-Fachber. Bd. 20 (1958) S. 52–56.
- [3] Koch, W.: Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV. Springer Verlag, Berlin 1955.
- [4] Müller-Guntrum, U.: Einige Gesichtspunkte bei der Planung städtischer 110-kV-Netze. Elektr.-Wirtsch. Bd. 59 (1960) S. 669–675.
- [5] Neugebauer, H.: Selektivschutz. Springer Verlag, Berlin 1955.
- [6] Schulze, E.: Das 110-kV-Netz von West-Berlin. Elektr.-Wirtsch. Bd. 58 (1959) S. 313–318.
- [7] Sternpunktbehandlung in Hochspannungsnetzen. Techn. Ber. Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen 1957, Nr. 181.

Aussprache

zu den Themen über Sternpunktbehandlung auf Seite 654 bis 677

M. Erich, Karlsruhe: Die bisherigen Erörterungen sollen noch durch Überlegungen über die Behandlung des Sternpunktes in neu zu erstellenden Mittelspannungs-Freileitungsnetzen mit einem Kabelanteil von 10 bis 15 % ergänzt werden. Als Grundlage für die Gegenüberstellungen nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten dient ein von der Badenwerk AG zur Zeit projektiertes 20-kV-Netz, das die charakteristischen Merkmale eines Überlandnetzes aufweist. Zur Besseren Beurteilung der verschiede-

Bemerkenswert ist, daß die Zahl der einpoligen Erdfehler der Zahl der kurzschlußartigen Fehler die Waage hält. Bei einpoligen Erdfehlern handelt es sich fast ausschließlich um selbstlöschende Erdschlüsse; nur rd. 5 % der einpoligen Erdfehler gehen in einen stehenden Erdschluß über. Auch bei den kurzschlußartigen Fehlern entfällt etwa die gleiche Prozentzahl der Fehler auf Vorgänge, an denen die Erde beteiligt ist.

Das untersuchte, neu zu erstellende Mittelspannungsnetz wird eine Stromkreislänge von 435 km haben und ist in Bild 1 dargestellt. Es handelt sich um ein Freileitungsnetz mit einem Kabelanteil von rd. 10 %, mit 15 unbesetz-

Tafel 1. Spezifische Störungszahlen aus dem Jahre 1959 für 8 Mittelspannungsnetze mit einer Stromkreislänge von 4000 km und einem spezifischen Erdschlußstrom von 2 bis 4 A/kV

Fehlerart	Anzahl der Störungen je 100 km
einpolige Erdfehler:	
selbstlöschende Erdschlüsse	12,6
stehende Erdschlüsse	0,7
Summe der einpoligen Erdfehler	13,3
kurzschlußartige Fehler:	
Doppelerdschlüsse	0,5
Kurzschlüsse	11,5
Summe der kurzschlußartigen Fehler	12,0
Summe der geklärten Fehler	25,3
ungeklärte und sonstige Fehler	2,9

nen Möglichkeiten der Sternpunktbehandlung sei zunächst eine Übersicht über die in ähnlichen 20-kV-Netzen aufgetretenen spezifischen Störungszahlen für das Jahr 1959 gegeben (Tafel 1).

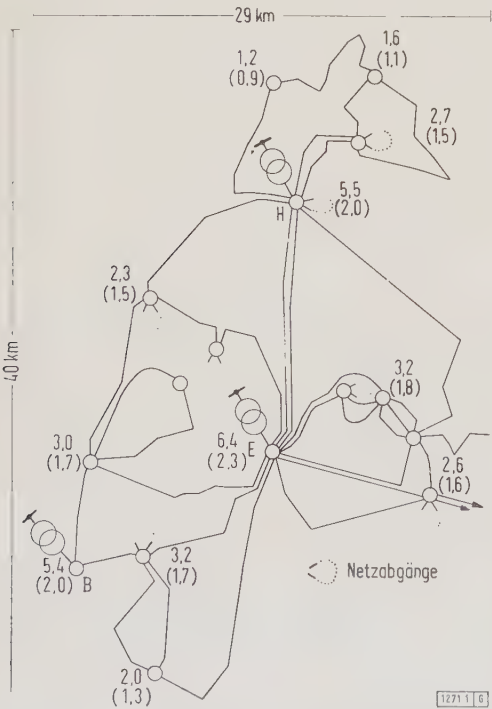


Bild 1. Plan des zu erstellenden Mittelspannungsnetzes mit den Einspeisestellen B, E und H. Die Zahlenwerte geben die Erdschlußströme in Kiloampere an. Die eingeklammerten Werte gelten für Erdung über Drosselspulen.

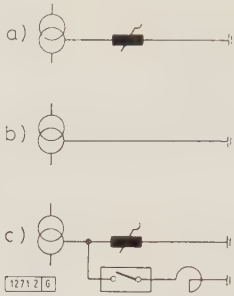


Bild 2. Verschiedene Arten der Sternpunktbehandlung in einem Mittelspannungsnetz.

- a) Erdung über Erdschlußspule (Erdschlußlöschung),
- b) starre Erdung,
- c) vorübergehende Überbrückung der Erdschlußspule durch eine Drosselspule.

ten Schalt- und Umspannstationen und rd. 170 Ortsnetzstationen. Das Mittelspannungsnetz soll zunächst in den beiden Punkten H und E, später dann noch in einem dritten Punkt B, über Transformatoren (110 kV/20 kV, 23 MVA) gespeist werden. Das Netz wird auf Grund guter Betriebserfahrungen in vergleichbaren Netzen vermascht betrieben und mit Distanzschutz ausgerüstet werden. Der Gesamterdschlußstrom errechnet sich zu rd. 200 A, der Reststrom zu rd. 20 A.

Sternpunkt über Erdschlußspulen geerdet, keine Ausrüstung des Netzes mit Erdschlußrelais

An den drei Einspeisestellen werden die Sternpunkte der Transformatoren auf der 20-kV-Seite über Erdschlußspulen für je 100 A geerdet (Bild 2 a). Die meisten einpoligen Erdfehler werden ohne Rückwirkung auf die Abnehmer gelöscht; nur etwa 5 % der Erdschlüsse bleiben stehen. Das Auffinden dieser stehenden Fehler kann größere Schwierigkeiten bereiten und erfordert wegen der notwendigen Schaltungen vielfach auch erhebliche Zeit (1/2 bis 1 h). Bei der Suche kann jedoch die Abschaltung von empfindlichen Abnehmern vermieden werden.

Eine Ausrüstung der Netze mit Erdschlußrelais erleichtert die Eingrenzung der Fehler nicht nennenswert, da zur einwandfreien Anregung der Erdschlußrelais bei vermaschtem Netz die Maschen teilweise geöffnet werden müssen und die Ablesung der Relais in den unbesetzten Stationen zu zeitraubend ist. Die finanziellen Aufwendungen für die vorgesehenen Petersen-Spulen betragen DM 64 000,—.

Sternpunkt starr geerdet, Ausrüstung des Netzes mit Kurzunterbrechung

Die starre Sternpunktterdung (Bild 2 b) erfordert von der betrieblichen Seite her die vollständige Ausrüstung des Netzes mit Kurzunterbrechung und eine Auslegung des

Distanzschutzes für die einwandfreie Erfassung der Erdkurzschlüsse. Unter diesen Voraussetzungen werden die meisten der einpoligen Erdfehler durch die Kurzunterbrechung, sofern ausreichende Arbeitsbedingungen vorliegen, ebenso bereinigt wie in einem kompensierten Netz, jedoch mit dem wesentlichen Unterschied, daß jede Bereinigung mit einem Spannungseinbruch verbunden ist, der bei der Vielzahl solcher einpoligen Fehler auch für nicht sehr empfindliche Abnehmer unangenehm werden kann. Doch sind die Bedingungen für das einwandfreie Arbeiten der Kurzunterbrechung durchaus nicht sichergestellt.

In Bild 1 sind die Erdkurzschlußströme eingetragen, die an den verschiedenen Stellen des vorliegenden Netzes auftreten. Bei Erdschlüssen in der Nähe der Einspeisestellen sind die Ströme genügend groß, so daß die erforderlichen Voraussetzungen für das erfolgreiche Arbeiten der Kurzunterbrechung gegeben sind. Bei Erdschlüssen in entfernten Netzteilen jedoch treten Erdkurzschlußströme in der Größenordnung von 1000 bis 2000 A auf, die sich auf mehrere Leitungen aufteilen. Die Aufteilung auf die einzelnen Leitungen ist entsprechend den unterschiedlichen Impedanzen nicht gleichmäßig, so daß bei den üblichen Stromwandlerübersetzungen von 300 A/5 A und 200 A/5 A in manchen Fällen keine Anregung stattfindet, zumindest treten jedoch Laufzeitadditionen auf, so daß die für eine erfolgreiche Kurzunterbrechung notwendigen Voraussetzungen nicht überall gegeben sind. Die Verhältnisse werden noch wesentlich ungünstiger, wenn nur zwei Einspeisestellen, z. B. in Schwachlastzeiten, in Betrieb sind.

Der Ausfall einer Leitung wird der Betriebsleitung erst durch Reklamationen seitens der Abnehmer bekannt.

Für die Höhe der finanziellen Aufwendungen ist noch bedeutsam, ob die zuständigen Gremien des VDE die Bemessung der Erdübergangswiderstände im Hinblick auf die Berührungs- und Schrittspannungen nach dem Erdkurzschlußstrom fordern. In Netzen mit Erdschlußlöschung braucht der Doppelerdschluß nicht berücksichtigt zu werden, da er sehr selten auftritt. In starr geerdeten Netzen ist aber jeder Erdfehler ein Erdkurzschluß. Die Wahrscheinlichkeit einer Gefährdung steigt auf das 25-fache, wenn man die spezifischen Störungsziffern zugrunde legt. Als kostenerhöhender Faktor kommen noch die Schutzmaßnahmen bei Näherungen an Fernmeldeleitungen hinzu, die im Gegensatz zum Höchstspannungsnetz bei Mittelspannungsnetzen weit häufiger auftreten können.

Die Kosten für starre Sternpunktterdung betragen:

zusätzliche Aufwendungen für Relais	DM 21 000,—
Ausrüstung mit Kurzunterbrechung	DM 144 000,—
insgesamt	DM 165 000,—
gegebenenfalls für die Verbesserung der Erdübergangswiderstände und für Potentialsteuerungen mindestens	DM 90 000,—
Gesamtaufwand	DM 255 000,—

Sternpunkt über Erdschlußspulen und bei stehendem Erdschluß vorübergehend über Kurzschluß-Begrenzungs-drosseln geerdet

Der größte Teil der einpoligen Erdfehler wird, wie bei jedem gelöschten Netz, ohne Rückwirkung auf die Abnehmer beseitigt. Nach dem Auftreten von stehenden Erdschlüssen wird jedoch der Sternpunkt des Netzes vorübergehend, etwa 6 bis 10 s, über kurzschlußbegrenzende Drosselspulen an Erde gelegt (Bild 2 c), wobei eine Drosselspule maximal einen Strom von 1000 bis 1200 A durchläßt. Diese Art der Sternpunktbehandlung vereinigt technisch die Vorzüge der beiden erstgenannten Verfahren, ohne daß sich deren Nachteile in vollem Maße auswirken. Das unangenehme Suchen stehender Erdschlüsse entfällt, da

diese vorübergehend zu einem Erdkurzschluß gemacht und dann durch den Distanzschutz abgeschaltet werden.

Gegenüber der starren Erdung ist hier jedoch noch weniger gewährleistet, daß die Erdkurzschlußströme zum Anregen der Relais ausreichen, wie das aus Bild 1 hervorgeht. Trotzdem kann man wohl annehmen, daß die größere Zahl dieser Fehler einwandfrei abgeschaltet wird. Bei dem restlichen Teil der Erdschlüsse wird eine Abschaltung entweder nicht selektiv oder gar nicht stattfinden. Im letzten Falle wird nach der Aufhebung der Erdung über Drosselspulen nach rd. 6 bis 10 s der Erdkurzschluß in einen stehenden Erdschluß in einem gelöschten Netz übergeführt.

Die Entscheidung, ob bei der Bemessung der Erdungswiderstände im vorliegenden Fall der Behandlung des Sternpunktes vom Erdkurzschlußstrom oder vom Erdschluß-Reststrom auszugehen ist, bleibt den zuständigen Gremien des VDE vorbehalten. Es darf aber wohl ohne weiteres angenommen werden, daß die Erdungswiderstände bei nur vorübergehender Erdung des Sternpunktes über Kurzschluß-Begrenzungs-drosseln — ebenso wie in gelöschten Netzen — nur nach dem Erdschluß-Reststrom bemessen zu werden brauchen, da stehende Erdschlüsse nicht häufiger vorkommen als Doppelerdschlüsse und der Erdkurzschlußstrom zeitlich auf 6 bis 10 s begrenzt ist. Aus dem gleichen Grund dürfte wohl auch die gegenseitige Beeinflussung der Mittelspannungsleitungen und der Fernmeldeleitungen wie in einem gelöschten Netz behandelt werden.

Der finanzielle Aufwand beträgt bei dieser Lösung:

für die drei vorgesehenen Petersen-spulen	DM 64 000,—
für zusätzliche Relaisaufwendungen	DM 21 000,—
für die drei erforderlichen kurzschluß-begrenzenden Drosselspulen	DM 50 000,—
insgesamt	DM 135 000,—

Sternpunkt über Erdschlußspulen geerdet, Ausrüstung des Netzes mit Erdschlußrelais und einer Fernwirkanlage

Soll in einem gelöschten Netz der stehende Erdschluß leicht erfaßt werden können, so ist das Netz mit Erdschlußrelais und einer Fernwirkanlage auszurüsten. Die Fernwirkanlage muß es gestatten, von einer Leitstelle aus das Netz nach Eintritt eines stehenden Erdschlusses soweit zu entmaschen, daß die Erdschlußrelais von dem zur Selektivanzei-ge notwendigen Anteil des Erdschluß-Reststromes beaufschlagt werden. Ferner hat die Fernwirkanlage die Aufgabe, die Anzeige der Erdschlußrelais zur Leitstelle zu melden.

Wenn der Betriebsingenieur die erforderliche Entmaschung durchgeführt und auf Grund der Angaben der Erdschlußrelais den Fehlerort erkannt hat, schaltet er die erdschlußbehaftete Leitung über die Fernwirkanlage ab. Die hierzu erforderliche Zeitspanne dürfte längstens 5 bis 10 min betragen. Der finanzielle Aufwand beträgt bei dieser Lösung unter Voraussetzung, daß der Grundausbau für die Fernwirkanlage aus anderen Gründen vorhanden ist:

für die drei Petersen-Spulen	DM 64 000,—
für die Erdschlußrelais und anteilige Kosten der Fernwirkanlage für die Übertragung der Anzeige	DM 95 000,—
	DM 159 000,—

Eine Übersicht über die Vor- und Nachteile der verschiedenen Arten der Sternpunktbehandlung sowie den finanziellen Aufwand enthält Tafel 2. Von den beiden Extremen (1. und 2. Vorschlag) ausgehend, verdient die Löschung über Petersenspulen gegenüber der starren Sternpunktterdung oder auch Erdung über kurzschlußbegrenzende

Drosselspulen aus technischen und wirtschaftlichen Gründen den Vorzug.

Die beiden anderen Vorschläge stellen eine erhebliche Vereinfachung der Netzführung dar, wobei die Unterschiede der Sternpunktbehandlung in ihren Auswirkungen auf den Netzbetrieb so gering sind, daß die Entscheidung für den einen oder anderen Gefühlssache ist. Beide Fälle setzen Petersenspulen voraus. Steht der Grundausbau einer Fernwirkanlage nicht zur Verfügung, so scheidet der zuletzt gemachte Vorschlag von vornherein aus. Ist diese Voraussetzung jedoch erfüllt, verdient dieser letztgenannte Vorschlag den Vorzug. Auf jeden Fall dürfte es sich empfehlen, unabhängig davon wie die Entscheidung auch ausfällt, die Verdrahtung in den zu erstellenden Schaltanlagen so auszuführen, daß der spätere Übergang von dem vorletzten zum letztgenannten Vorschlag ohne große Änderung möglich ist.

Tafel 2. Vor- und Nachteile verschiedener Arten der Sternpunktbehandlung.

Sternpunktbehandlung	Vorteile	Nachteile	finanzieller Aufwand DM
1. Sternpunkt über Erdschlußspulen geerdet, keine Ausrüstung des Netzes mit Erdschlußrelais	Beseitigung der Erdfehler größtenteils ohne Rückwirkung	Schwierigkeit der Suche des Fehlerortes eines stehenden Erdschlusses	64 000,—
2. Sternpunkt starr geerdet, Ausrüstung des Netzes mit Kurzunterbrechung	größter Teil der Erdfehler wird einwandfrei beseitigt	Beunruhigung des Netzes durch die große Zahl der Kurzunterbrechungen. Nicht in allen Fällen sind die Voraussetzungen für ein einwandfreies Arbeiten des Schutzes gegeben. Bemessung der Erdübergangswiderstände nach dem Erdschlußstrom und Behandlung von Näherungen. Keine Meldung an eine Leitstelle, welche abgeschaltet wurde	255 000,—
3. Sternpunkt über Erdschlußspulen und bei stehendem Erdschluß vorübergehend über Kurzschluß-Begrenzungs-drosseln geerdet	größter Teil der Erdfehler wird beseitigt. Größter Teil der stehenden Erdschlüsse wird abgeschaltet. Bemessung der Erdübergangswiderstände und Behandlung der Näherungen wie in einem gelöschten Netz	keine Meldung an eine Leitstelle, welche Leitung abgeschaltet wurde.	135 000,—
4. Sternpunkt über Erdschlußspulen geerdet, Ausrüstung des Netzes mit Erdschlußrelais und einer Fernwirkanlage	größter Teil der Erdfehler wird ohne Rückwirkung beseitigt. Fehlerorte der stehenden Erdschlüsse werden in einer Leitstelle erkannt und von dort abgeschaltet.	stehender Erdschluß kann bis zur Durchführung der notwendigen Schaltung etwa 5 bis 10 min stehen bleiben	159 000,—

Die Höhe der finanziellen Aufwendungen, die zwar etwa im Verhältnis 1:2,5:2:2,5 stehen, treten gegenüber den technischen Überlegungen in den Hintergrund, da ihre absolute Höhe im Vergleich zu den Gesamtaufwendungen für die Erstellung des Netzes verschwindend klein ist.

M. Honnens, Darmstadt: Bei der Ausarbeitung neuer Vorhaben muß man nicht nur die Erfahrungen der Vergangenheit berücksichtigen, sondern auch die überschaubare Entwicklung der Technik in den nächsten Jahren. Daher

seien einige Gedanken zur Sternpunktbehandlung bei einem geplanten 110-kV/20-kV-Umspannwerk erörtert, das 1963 in Betrieb kommen soll. Es wird ein städtisches Kabelnetz und ein Überlandnetz versorgen. Bei Inbetriebnahme wird die Höchstlast jedes Netztes etwa 25 MW betragen. Es wird angenommen, daß sie in 10 Jahren auf 2×60 MW steigt. Eine Nachrechnung der Spannungsabfälle hat ergeben, daß diese Last sowohl im städtischen 20-kV-Netz als auch im Überlandnetz noch von einem Punkt eingespeist werden kann. Dann ist die Einspeisung von dem genannten Umspannwerk mit zwei Transformatoren von je 63 MVA am wirtschaftlichsten. Um dabei die Kurzschlußleistung auf 350 MVA zu begrenzen, sollen die Transformatoren etwa 18% Kurzschlußspannung erhalten und getrennt betrieben werden. Sie können auch über I_s -Begrenzer parallelgeschaltet werden, weil diese sie bei schwerer Kurzschlüssen mit extrem kurzer Schaltzeit voneinander trennen.

Das Stadtnetz wird bei Inbetriebnahme etwa 100 km Kabel, das Überlandnetz etwa 120 km Kabel und 100 km Freileitung haben. Nimmt man an, daß bis zum Endausbau die Kabellänge auf das 1,5-fache steigt, dann wird der Erdschlußstrom im Stadtnetz etwa 750 A, im Überlandnetz etwa 850 A betragen. Dieser hohe Erdschlußstrom ergibt sich aus der Netzspannung von 20 kV, dem hohen Kabelanteil, der ausschließlichen Verwendung von Dreimantelkabeln und dem großen Netz mit 2×60 MW Höchstlast im Endzustand. Zweifelloso geht aber die Entwicklung in Richtung auf höhere Betriebsspannung, vermehrte Verwendung von Kabeln, größere Leistungen und damit Parallelschaltung möglichst weniger Transformatoreinheiten. Man vermutet daher, daß ähnliche Aufgaben in den nächsten Jahren auch an anderer Stelle auftreten werden, so daß dieses Beispiel vielleicht einiges Interesse verdient.

Für die obigen beiden Netze gilt es, die günstigste Sternpunktbehandlung zu finden. Dabei ist beabsichtigt, eine höhere Betriebssicherheit zu gewährleisten, als dies in kleineren Netzen notwendig und üblich ist.

Nach den derzeitigen Erfahrungen verbietet sich der Betrieb mit freiem Sternpunkt. Dagegen wäre es ohne weiteres möglich, die beiden Netze mit Erdschlußkompensation zu betreiben. Solange sie getrennt „gefahren“ werden, wird man der Forderung der Post, den Erdschluß-Reststrom auf 1,2 bis 1,5 A/kV zu begrenzen, noch einigermaßen genügen, wenn die Petersen-Spulen mit selbsttätiger Einstellung ausgerüstet werden. Ein Parallelbetrieb des Stadt- und Überlandnetzes wäre dagegen nicht mehr zulässig, obgleich er zur Verminderung der Transformatorenverluste und für die Momentanreserve bei Ausfall eines Transformators erwünscht ist. Die besonderen Bedenken sind jedoch, daß die Erdschlußsuche längere Zeit in Anspruch nimmt, zu Doppelerdschlüssen führt und umfangreiche Umschaltungen notwendig macht. Es ist nämlich vorgesehen, beide Netze weitgehend vermascht zu betreiben. Gegenüber dem strahlenförmigen Betrieb bietet das den Vorteil guter Reserve, kleiner Spannungsabfälle und geringer Verluste in den Leitungen. Man kann leicht ausrechnen, daß ein gleichwertiges Strahlennetz etwa 20 bis 30% höhere Aufwendungen für die Leitungen erfordert. Diese Aufwendungen werden durch die einfacheren Schutzeinrichtungen des Strahlennetzes bei weitem nicht ausgeglichen. Die Planung setzt deshalb grundsätzlich ein stark vermaschtes Netz im Stadt- und Überlandgebiet voraus und nimmt die größeren Schwierigkeiten bei der Eingrenzung der Erd- und Kurzschlüsse bewußt in Kauf. Man kann sie zum Teil dadurch umgehen, daß bei Erdschluß die Kuppelstellen aufgetrennt werden und ein Strahlennetz hergestellt wird. Dann aber geht der entscheidende Vorteil der Vermaschung, nämlich die größere Reserve, gerade im Störfall verloren.

Aus diesen Überlegungen kam man zu der Forderung, jeden Erdschluß genau wie jede andere Störung selektiv abzuschalten. Ein längerer Betrieb bei Erdschluß scheint nicht nur eine Gefahr wegen der langdauernden höheren

Spannungsbeanspruchung des gesamten Netzes, sondern auch wegen der Unfallgefährdung an der Erdschlußstelle. Das gilt in besonderem Maße für das Freileitungsnetz, in dem hohe Berührungsspannungen bei Erdschluß auftreten können. Die selektive Abschaltung von Dauererdschlüssen ist im kompensierten Netz praktisch nicht zu erfüllen, wohl aber bei starrer oder halbstarrer Sternpunktterdung. Hierfür stehen genau wie bei den mehrpoligen Kurzschlüssen in vermaschten Netzen nur zwei Arten von Schutzrelais zur Verfügung, und zwar entweder Differentialrelais oder Distanzrelais.

Differentialrelais, die nur auf den Nullstrom ansprechen, können hochempfindlich und fast ohne Verzögerung arbeiten, so daß selbst hochohmige Erdschlüsse selektiv und in kürzester Zeit abgeschaltet werden. Leider sind Differentialrelais wegen der erforderlichen Hilfsadern praktisch nur im Kabelnetz verwendbar und bieten keinen Reserveschutz bei einem Fehler in den nachfolgenden Stationen oder auf den angrenzenden Leitungen. Diese Nachteile vermeiden die in Deutschland besonders hoch entwickelten Distanzrelais. Sie können jedoch die Distanz, d. h. die Impedanz der Kurz-

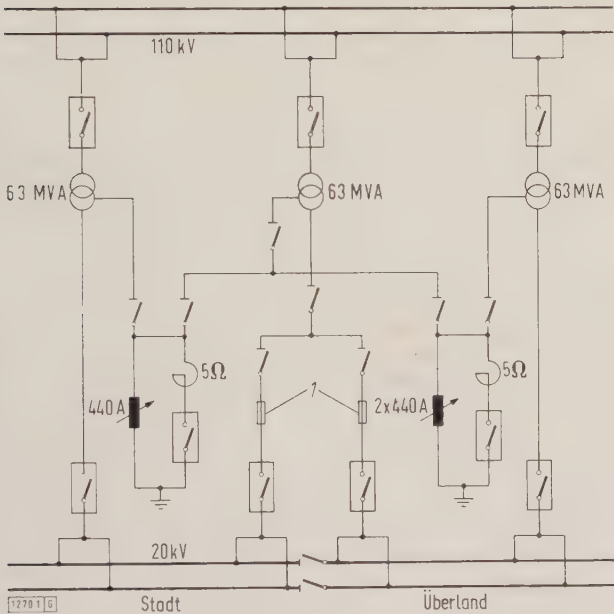


Bild 1. Entwurf für ein Umspannwerk mit 110 kV/20 kV für 125 MVA Höchstlast und 350 MVA Kurzschlußleistung mit Erdschlußspulen und Überbrückungsschaltern.
1 I_s -Begrenzer

schlußschleife Leiter—Erde, nur dann messen, wenn das Meßglied auf diese Schleife geschaltet wird. Bei Überstromanregung muß also der Strom im erdgeschlossenen Leiter wesentlich den Betriebsstrom überschreiten (Impedanzanregung ist für Mittelspannungsnetze zu aufwendig). Dieser Strom wird durch die hohe Impedanz der Schleife Leiter—Erde und durch Erdübergangswiderstände, gegebenenfalls auch durch die im Sternpunkt des Transformators angeschlossene Impedanz begrenzt.

Bei 20-kV-Kabeln beträgt die Impedanz dieser Schleife etwa das 2- bis 5-fache der Mitimpedanz, bei den Freileitungen das 1,5- bis 2-fache. In den beiden Netzen wird das Ansprechen solcher Distanzrelais gewährleistet sein, wenn der Übergangswiderstand an der Erdschlußstelle unter etwa 20 bis 50 Ω , je nach Einbaustelle des Relais, liegt und die Sternpunktimpedanz dagegen klein ist. Erdschlüsse mit größeren Übergangswiderständen können von Impedanzrelais mit Überstromanregung nicht selektiv abgeschaltet werden. Das gleiche gilt im Prinzip übrigens für Doppelerdschlüsse in kompensierten Netzen.

Tafel 1. Bemessung der Betriebs- und Schutzerdungen bei verschiedener Sternpunktbehandlung.

Art der Erdung	Art der Sternpunktbehandlung		
	Erdschlußkompensation	Sternpunktterdung	Erdschlußspule mit Überbrückungsschalter
Bemessung der Betriebserdung nach	Erdschlußstrom	Erdkurzschlußstrom	Erdkurzschlußstrom
Bemessung der Schutzerdungen nach	Erdschluß-Reststrom	Erdkurzschlußstrom	Erdschluß-Reststrom

In Deutschland ist die Sternpunktterdung in Freileitungsnetzen wegen der Berührungsspannungen an Stationen und Freileitungsmasten sowie mit Rücksicht auf die VDE-Vorschriften und Postbestimmungen praktisch nicht durchführbar. Man kann sich aber sowohl die Vorteile der Erdschlußlöschung als auch die der Sternpunktterdung zunutze machen, wenn die Erdschlußspule nach Eintreten eines Dauererdschlusses durch einen Nebenschlußschalter, der in Reihe mit einer Strombegrenzungsdrossel liegt, überbrückt wird.

Diese Schaltung ist in Bild 1 für das vorhin erwähnte Umspannwerk gezeigt. Die 20-kV-Doppelsammelschiene enthält zwei Abschnitte für das Stadt- und Überlandgebiet mit 63-MVA-Transformatoren. Der Reservetransformator kann über I_s -Begrenzer mit jedem anderen Transformator parallelgeschaltet werden. Über die gleichen I_s -Begrenzer können auch die beiden Sammelschienenabschnitte zusammengeschaltet werden, so daß auch bei Parallelbetrieb aller drei Transformatoren nur die Kurzschlußleistung eines Transformators zu berücksichtigen ist. Die richtige Auslösung der I_s -Begrenzer läßt sich durch besondere Schaltung sicherstellen. Jedem Sammelschienenabschnitt entspricht eine Erdschlußspule in der Ausführung als Taucherkernspule für 440 A, die bei Bedarf durch eine gleich große feste Spule ergänzt wird. Parallel dazu sind jeweils die Strombegrenzungsdrosselspule und der Überbrückungsschalter angeordnet. Die Drosselspulen sind für 5 s Einschaltdauer vorgesehen und begrenzen den Erdkurzschlußstrom auf etwa 2000 A. Dieser verhältnismäßig hohe Erdkurzschlußstrom wird für notwendig gehalten, damit auch die Relais der Reservestufe noch ansprechen. Der Überbrückungsschalter soll bei Dauererdschluß schließen und nach der zweiten Zeitstufe der Distanzrelais öffnen.

In Tafel 1 werden die drei Verfahren der Sternpunktbehandlung hinsichtlich der Bemessung der Betriebs- und Schutzerdungen und in Tafel 2 in bezug auf die Bereinigung von Erdfehlern miteinander verglichen. Danach hat der Betrieb mit Erdschlußspule und Überbrückungsschalter erhebliche Vorteile. Sämtliche Lichtbogen-Erdschlüsse werden durch die Petersen-Spule selbsttätig gelöscht, ohne daß

Tafel 2. Bereinigung von Erdfehlern bei verschiedener Sternpunktbehandlung.

Art der Störung	Art der Sternpunktbehandlung		
	Erdschlußkompensation	Sternpunktterdung	Erdschlußspule mit Überbrückungsschalter
Erdschlußwischer	Löschung	Abschaltung (Erdkurzschluß)	Löschung
Dauererdschlüsse (unter 20 bis 50 Ω)	Erdschlußsuche	Abschaltung (Erdkurzschluß)	Abschaltung (Erdkurzschluß)
Dauererdschluß, hochohmig (z. B. Seilbruch)	Erdschlußsuche	Erdschlußsuche	Erdschlußsuche
Dauererdschluß mit Übergang zu Doppelerdschluß	Teilabschaltung und Erdschlußsuche	Abschaltung (sehr selten)	Abschaltung (selten)

es zu einem Kurzschluß oder einer Abschaltung kommt. Bei Dauererdschlüssen fällt die lästige Suche im Kabelnetz vollständig fort und beschränkt sich im Freileitungsnetz auf die seltenen Fälle eines Erdschlusses an hochohmig geerdeten Masten oder bei Seilbruch.

Die Sternpunktterdung bedingt dreipolige Ausführung sämtlicher Schutzrelais. Der Transformatorschutz, das sind größtenteils Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen, zum Teil aber auch Leistungsschalter mit Relais, ist wie üblich sowieso dreipolig ausgebildet. Das Gleiche gilt für alle Kuppelstellen mit 20-kV-Netzen in fremdem Eigentum, dagegen nicht für den übrigen Leitungsschutz. Hier entstehen höhere Kosten für die dreipolige Ausführung der Überstrom-Zeitrelais und der Richtungsrelais und für die zugehörigen dritten Stromwandler. Bei den Distanzrelais ist zu

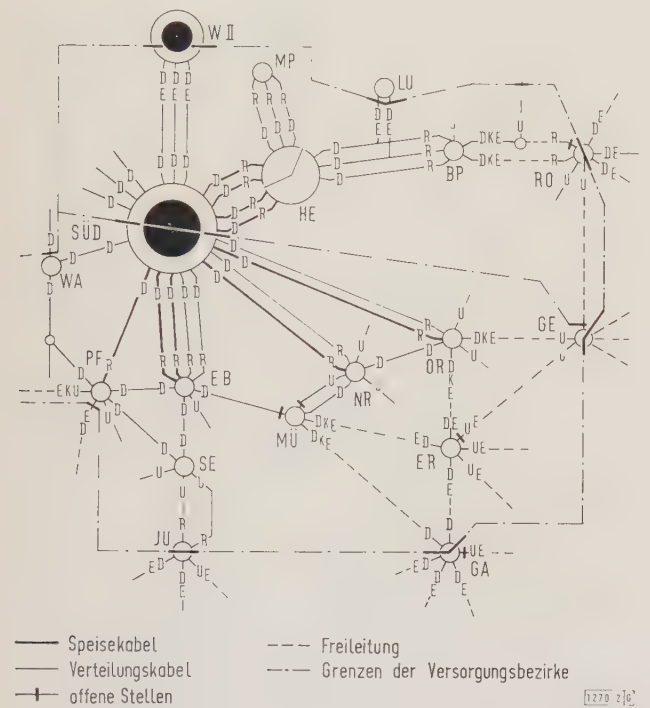


Bild 2. Schutzeinrichtungen in einem 20-kV-Netz mit Erdschlußspulen und Überbrückungsschaltern.

D Distanzrelais R Richtungsrelais
E Erdschluß-Richtungsrelais U Überstrom-Zeitrelais
K Kurzunterbrechung

beachten, daß sie zur selektiven Doppelerdschlußerfassung sowieso mit drei Stromwandlern ausgerüstet werden müssen. Distanzrelais für kompensierte Netze sollen bei den Doppelerdschlüssen R-S und T-S die Erdschlußstelle S nicht abschalten. Sie müssen es aber unbedingt, wenn der Sternpunkt im Verlauf des Fehlers vorübergehend geerdet wird. Die Abschaltung der Fehlerstelle S wird durch eine kleine Zusatzeinrichtung am Distanzschutz erreicht, die nur einen geringen Mehrpreis bedingt.

Diese Relais sind bei obigem Vorschlag für die selektive Abschaltung aller mehr- oder einpoligen Fehler im gesamten Kabelnetz ausreichend. Bild 2 zeigt das geplante Stadt- und Überlandnetz und man sieht, daß alle Kabel nur durch Distanzrelais (D) oder Richtungsrelais (R) geschützt sind.

Im Freileitungsnetz werden jedoch die in geringer Zahl auftretenden hochohmhigen Erdschlüsse nicht abgeschaltet. Sie bleiben nach Unterbrechung des Überbrückungsschalters der Erdschlußspule bestehen und führen den Erdschluß-Reststrom entsprechend dem gelöschten Betrieb. Für diese wenigen Fälle ist vorgesehen, an allen Übergangsstellen von

Kabel auf Freileitung außer den Kurzunterbrechungs-Schaltern Erdschlußrichtungsrelais zur Erdschlußsuche einzubauen. Weiterhin sind alle wichtigen Knotenpunkte des Freileitungsnetzes mit Erdschlußrichtungsrelais ausgerüstet. Besonders zu beachten sind die Kupplungsmöglichkeiten mit den übrigen 20-kV-Netzen. Es kann jederzeit vorkommen, daß ein bestimmter Teil des fremden Netzes an das Umspannwerk angeschlossen wird und damit den Bedingungen der Sternpunktterdung unterliegt. Deshalb wurde Vorsorge getroffen, daß an allen solchen Kupplungsstellen dreipolige Schutzeinrichtungen und Erdschlußrichtungsrelais eine Erdschlußabschaltung oder Erdschlußsuche gewährleisten.

Der obige Vorschlag erfüllt alle Wünsche des Ingenieurs. Es bleibt zu fragen, ob er wirtschaftlich vertretbar ist. Dazu sind die Schutzeinrichtungen des gleichen Netzes bei dem üblichen Betrieb mit Erdschlußkompensation zu vergleichen. Es wurde angenommen, daß alle Knotenpunkte des Kabel- und Freileitungsnetzes mit Erdschlußrichtungsrelais ausgerüstet werden, soweit sie nach dem vorigen Vorschlag eine selektive Abschaltung gewährleisten. Natürlich wäre es möglich, eine gewisse Zahl von Erdschlußrelais einzusparen. Ebenso könnte man aber beim ersten Vorschlag manche Relais zweipolig ausführen. Ein echter Vergleich ist aber nur bei voller Relais-Ausstattung in beiden Fällen möglich. Es ergeben sich dann die Bedarfszahlen in Tafel 3.

Tafel 3. Schutzeinrichtungen bei gelöschtem Netz und bei Erdschlußspulen mit Überbrückungsschaltern.

Gerät	Relais- und Wandlerbedarf	
	bei gelöschtem Netz	bei Erdschlußspulen mit Überbrückungsschaltern
	Stück	Stück
Distanzrelais	61 (zweipolig)	61 (dreipolig)
Richtungsrelais	23 (zweipolig)	23 (dreipolig)
Überstromrelais	25 (zweipolig)	25 (dreipolig)
Kurzunterbrechungs-Relais	7	7
Erdschlußrelais (mit Umbauwandlern)	104	25
Relais gesamt	220	141
Stromwandler (ohne Umbauwandler)	279	327
Kosten DM	420 000,—	354 000,—

Der Bedarf an Distanzrelais, Richtungsrelais, Überstromrelais sowie an Kurzunterbrechungs-Relais für die Übergangsstellen von Kabel auf Freileitung ist in beiden Fällen der gleiche. Im gelöschten Netz sind jedoch wesentlich mehr Erdschlußrelais, dafür weniger Stromwandler erforderlich. Die gesamten Kosten sämtlicher Relais und Stromwandler — daß die Stromwandler auch für andere Zwecke in Anspruch genommen werden, ist nicht berücksichtigt — ergeben für den Betrieb mit Überbrückungsschaltern eine Ersparnis von 66 000,— DM. Sie reicht bei weitem aus, um im Umspannwerk die Überbrückungsschalter mit Strombegrenzungs-drosseln und die verbesserte Erdungsanlage einzubauen.

Die Studie zeigt, daß eine zunächst sehr aufwendig erscheinende Lösung insgesamt keine Verteuerung bringt. Es ergeben sich jedoch vermutlich erhebliche betriebliche Vorteile. Alle Lichtbogen-Erdschlüsse werden durch die Erdschlußspule gelöscht und verschwinden selbsttätig, ohne eine nennenswerte Spur im übrigen Netz zu hinterlassen. Dauererdschlüsse werden zum allergrößten Teil mit der üblichen Relaiszeit abgeschaltet. Das ist vorteilhafter als die Möglichkeit und der Zwang, bis zum Aufsuchen des Fehlers,

d. h. meist auf die Dauer von mehreren Viertelstunden, im Erdschluß zu „fahren“. Die Unsicherheit, die der in Deutschland bisher noch nicht verwirklichte Vorschlag in sich birgt, nämlich die Gefahr, daß hochohmige Dauererdschlüsse im Freileitungsnetz bestehenbleiben, wird durch großzügigen Einbau von Erdschutz-Richtungsrelais berücksichtigt. Die Teilnetze für Stadt- und Überlandgebiet können jederzeit zusammengeschaltet werden; bei Bedarf kann man auch mit den übrigen Umspannwerken, die sämtlich mit Erdschlußlöschung ausgerüstet sind, Parallelschaltungen durchführen.

Schließlich kann auch ohne wesentlichen Mehrpreis auf den Betrieb mit reiner Erdschlußlöschung oder mit halbstarrender Erdung ohne Erdschlußlöschung übergegangen werden, wenn die zukünftigen Erfahrungen eines dieser Systeme sich als vorteilhafter ergeben sollten. Es besteht noch der Wunsch, daß der VDE das Verfahren nicht durch verschärfte Bestimmungen erschweren möge; denn durch die Erdschlußlöschung, verbunden mit kurzfristiger Abschaltung der meisten Dauererdschlüsse, wird vermutlich zusätzliche Sicherheit geboten.

H. Baatz, Nellingen: M. Erich und M. Honnens haben auf ein auch im Ausland teilweise angewandtes Verfahren hingewiesen. Danach wird in Mittelspannungs-Verteilungsnetzen mit Sternpunktterdung über Erdschlußdrosselspulen die selektive Abschaltung von Dauererdschlüssen dadurch bewirkt, daß zur Anregung des Schutzes die Erdschlußdrosselspule kurzzeitig entweder kurzgeschlossen oder durch eine niederohmige Reaktanz überbrückt wird. Als Mitarbeiter des Arbeitsausschusses VDE 0141 hatte ich schon früher auf die auch bei uns später mögliche Anwendung dieses Verfahrens hingewiesen.

In einer Sitzung im Jahre 1957 kam der Ausschuß zu der Ansicht, daß ein solcher Erdkurzschluß wegen seiner Seltenheit wie ein Doppelerdschluß anzusehen sei. Es bestände damit die Möglichkeit, ihn in gleicher Weise zu behandeln, d. h. an den Masterdungen im Netz sind keine besonderen Vorkehrungen zu treffen. Diese werden nur für den Reststrom bemessen, und die kurzzeitige Überbrückung der Erdschlußspule bei einem Dauererdschluß entspricht dem als Ausnahme betrachteten Doppelerdschlußfall. Aus den Zahlen von M. Erich geht hervor, daß Dauererdschlüsse etwa die gleiche Häufigkeit haben wie Doppelerdschlüsse. Die Wahrscheinlichkeit eines stehenden Erdschlusses ist somit ebenfalls sehr gering.

U. Stoll, Hamburg: Bevor über Fehler mit Erdberührung in den 25-kV-Netzen der HEW¹⁾ berichtet wird, seien zunächst einige Netz-Kenngrößen genannt. Solange das 25-kV-Netz der HEW Transportaufgaben zu erfüllen hatte, wurde es zusammengeschaltet und vermascht in zwei Teilnetzen betrieben. Diese Teilnetze wurden durch eine Reihe von Löschspulen kompensiert und der Erdschlußstrom wuchs auf etwa je 1200 A an. Die Transportaufgabe wurde dann von einem überlagerten 110-kV-Netz übernommen, das 25-kV-Netz wurde zu einem Verteilernetz und danach nur noch geringfügig erweitert. Es besteht zur Zeit aus etwa 860 km Kabel und 45 km Freileitungen mit einem Gesamterdschlußstrom von etwa 2700 A. Durch die Speisung aus dem überlagerten 110-kV-Netz wurde es erforderlich, die 25-kV-Netze in galvanisch getrennte Teilnetze unterschiedlicher Ausdehnung aufzulösen. Hierbei entstanden, wie aus dem unteren Teil der Tafel 1 hervorgeht, 12 Teilnetze, von denen mit Hilfe der vorhandenen Erdschluß-Löschein-

richtungen alle Netze mit Erdschlußströmen über 300 A voll oder teilweise gelöscht werden konnten.

Die Aufteilung der Teilnetze nach ihrer Sternpunktbehandlung (im unteren Teil der Zahlentafel 1) weist aus, daß von den 12 Teilnetzen

6 mit freiem Sternpunkt,
3 voll gelöscht,
2 zu etwa 80 % kompensiert,
1 zu etwa 50 % kompensiert

betrieben werden. Die Restströme sind in den voll gelöschten Netzen am kleinsten und betragen 20 bis 50 A. Bei den teilweise gelöschten Netzen wachsen sie auf 25 bis 100 A bzw. 100 bis 150 A an. Die Erdschlußströme der Netze mit freiem Sternpunkt liegen schließlich zwischen 25 und 250 A.

Tafel 1. Prozentualer Anteil der Fehler mit Erdberührung im 25-kV-Netz der HEW in der Zeit von 1956 bis 1960.

Fehlerart	Fehleranzahl	davon in Netzen mit einem Kompensationsgrad von etwa			
		100 %	80 %	50 %	0 %
selbstlöschender Erdschluß	23	5	8	4	6
stehender Erdschluß	28	14	7	2	5
Erdschluß mit Übergang zum Kurzschluß (1 Fehlerort)	35	15	8	0	12
Erdschluß mit Übergang zum Doppelerdschluß (2 Fehlerorte)	3	1	1	1	0
Summe	89	35	24	7	23
Aufteilung der Teilnetze nach ihrer Sternpunktbehandlung					
	insgesamt	Netz gelöscht zu etwa			
		100 %	80 %	50 %	0 %
Anzahl der Teilnetze	12	3	2	1	6
Rest- bzw. Erdschlußstrom A	—	20 bis 50	25 bis 100	100 bis 150	25 bis 250

In den fünf Jahren von 1956 bis 1960 traten in den 25-kV-Netzen insgesamt 89 Fehler mit Erdberührung auf. Diese Fehlerzahl ist immerhin schon so groß, daß versucht werden soll, einen Zusammenhang zwischen Fehlerart und Sternpunktbehandlung herzustellen. Hierzu soll der obere Teil von Tafel 1 dienen.

Insgesamt 23 Fehler oder etwa ein Viertel aller Fehler waren selbstlöschende Erdschlüsse. Es ist zu erwähnen, daß diese durchaus nicht alle in den beiden Netzen mit Freileitungsanteil liegen. Die Netze mit Freileitungsanteil gehören nämlich zu den voll gelöschten Netzen. Der Hauptteil der selbstlöschenden Erdschlüsse lag demnach in Kabelnetzen. Es waren hauptsächlich Muffenfehler, bei denen der Erdschlußlichtbogen durch die erhitzte Vergußmasse wieder gelöscht wurde. Von den selbstlöschenden Erdschlüssen trat nur etwa ein Viertel in den sechs Netzen mit freiem Sternpunkt auf.

Die stehenden Erdschlüsse sind mit 28 Fällen ein knappes Drittel aller Fehler. Nur 5 von den 28 stehenden Erdschlüssen traten in den Netzen mit freiem Sternpunkt auf. Die Fehlerdauer bis zur Abschaltung betrug bis zu einer Stunde. Man erwartet, diese Zeiten durch vermehrten Einsatz von Erdschlußwischerrelais erheblich herabsetzen zu können.

Den größten Fehleranteil stellen mit 35 Fällen die Erdschlüsse mit Übergang zum Kurzschluß. Hier von liegen 25 Fehler oder zwei Drittel aller Fälle in den fünf voll oder zu 80 % gelöschten Netzen, 12 Fehler oder ein Drittel aller Fälle in den Netzen mit freiem Sternpunkt.

1) HEW = Hamburgische Electricitäts-Werke.

In den Netzen mit freiem Sternpunkt ist die Neigung von Erdfehlern, in den Kurzschluß überzugehen, demnach anscheinend nicht größer als in den gelöschten Netzen. Man erwartet aber allgemein, die Zahl der in den Kurzschluß übergehenden Erdschlüsse durch schnelleres Erfassen der erdschlußbehafteten Strecke noch herabsetzen zu können. Hierzu wird ein Teil der 25-kV-Abgänge mit Erdschlußwischer-Relais ausgerüstet.

In den Doppelerdschluß übergegangen sind nur drei Erdschlüsse, davon liegt keiner in den sechs Netzen mit freiem Sternpunkt. Es sei an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich hervorgehoben, daß nach der Betriebspraxis der HEW mit den früheren großen 25-kV-Netzen die Verkleinerung der Netze durch Aufteilung das wirksamste Mittel ist, die Zahl der Doppelerdschlüsse klein zu halten.

Insgesamt glaubt man, der Zusammenstellung folgendes entnehmen zu können:

Die sechs Netze mit freiem Sternpunkt und insgesamt 23 Fehlern schneiden gegenüber den drei voll gelöschten Netzen mit 35 Fehlern und den drei teilweise kompensierten Netzen mit 31 Fehlern recht gut ab. Trotz der beachtlichen Fehlerzahl zeigt sich aber keine Art der Sternpunktbehandlung der anderen eindeutig überlegen. Das besagt aber nicht, daß man aus der Statistik nach Tafel 1 keine Schlüsse ziehen kann. Sie wird insgesamt vielmehr dahin gedeutet, daß die Reihenisolation der 25-kV-Netze so hoch liegt, daß die Art der Sternpunktbehandlung auf die Art der Erdfehler keinen entscheidenden Einfluß hat.

Als bedeutsam ist der Tafel 1 ferner zu entnehmen: Von den 89 Fehlern mit Erdberührung sind 51 selbstlöschende oder stehende Erdschlüsse. Mehr als die Hälfte dieser Fehler, die bei der Praxis der HEW durch Schaltmaßnahmen behoben wurden, hätten also bei der wirksamen Sternpunktterdung zur sofortigen Auslösung geführt. Es besteht daher kein Anlaß dafür, von der bisherigen Betriebsweise abzugeben; nämlich erstens 25-kV-Netze bis zu Erdschlußströmen von 200 A bis 300 A mit freiem Sternpunkt zu betreiben, was überhaupt keine Aufwendungen bezüglich der Sternpunktbehandlung bedeutet, und zweitens größere Netze ganz oder teilweise zu löschen, was die Freizügigkeit von Kabelschaltungen an den Stoßstellen der Netze nicht einschränkt.

Die HEW beabsichtigen durchaus nicht, ihre 25-kV-Netze wirksam zu erden, weil dies mit erheblichen Aufwendungen auf dem Schutzgebiet und für Sternpunktbildner und Sternpunktrosseln verbunden ist, ohne daß dafür betrieblich ein genügender Gegenwert geboten wird.

Da wahrscheinlich noch einer Reihe von insbesondere städtischen EVU eine ähnliche Entwicklung ihrer 25-kV- oder 30-kV-Netze bevorsteht, wie sie bei den HEW stattgefunden hat, dürften diese Ausführungen daher von allgemeinem Interesse sein.

H. Zaduk, München: Professor Baatz hat in seinem einleitenden Vortrag schon darauf hingewiesen, daß Vorschriften über zulässige Berührungsspannungen in Hochspannungsnetzen mit starrer Sternpunktterdung eigentlich nur in Deutschland und Österreich bestehen, nicht aber in den Ländern, die seit jeher ihre Netze mit starrer Sternpunktterdung betreiben. Er hat auch erwähnt, daß sich in den USA das AIEE-Schaltanlagen-Komitee mit der Frage der Schritt- und Berührungsspannungen eingehend befaßt hat. Auf diese Untersuchungen möchte ich etwas näher eingehen.

Für die Gefährdung des Menschen ist nicht die Spannung, sondern der durch den Körper fließende Strom entscheidend. Ströme von 10 bis 15 mA können schon sehr schmerzhaft sein und Muskelzusammenziehungen zur Folge haben. Bei noch höheren Strömen kann durch Herzkammer-

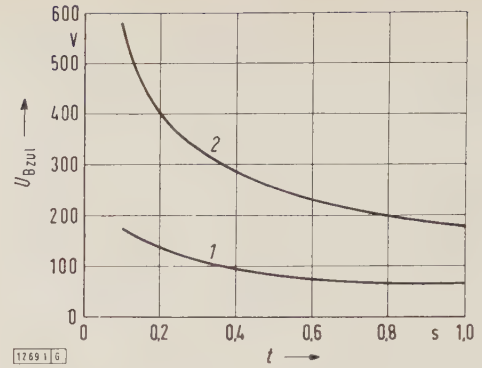


Bild 1. Abhängigkeit der zulässigen Berührungsspannung $U_{B\text{zul}}$ von der Einwirkungsdauer t .

1 nach VDE 0141/11. 58, § 27, Bild 7

2 nach AIEE-Committee Report 1958 berechnet.

flimmern der Tod eintreten. Aus eingehenden Tierversuchen mit Stromstößen bei einer Einwirkungsdauer von 0,3 bis 3 s ergab sich, daß Herzkammerflimmern vermieden wird, wenn der Effektivwert des Stromes I_t , der durch den Körper fließt und die Dauer t der Einwirkung der empirischen Formel

$$I_t^2 t = 0,027 \text{ A}^2 \text{ s}$$

genügen, die Baatz schon erwähnt hat. Der zulässige Strom durch den Körper ergibt sich daraus zu:

$$I_t = \frac{0,165 \text{ A}}{\sqrt{t/s}}$$

Wenn nun der Körperwiderstand R_K und der Erdübergangswiderstand R_F zwischen einem Fuß und dem Boden gegeben sind, erhält man für die Schrittspannung den Ausdruck

$$U_S = (R_K + 2 R_F) \cdot I_t$$

und für die Berührungsspannung

$$U_B = (R_K + 0,5 R_F) \cdot I_t$$

Für die Schrittspannung ist also die Reihenschaltung des Körperwiderstandes aus zwei Fußwiderständen maßgebend. Bei einer Berührung fließt der Strom von einer Hand durch den Körper zu den Füßen. Für die Berührungsspannung ist also die Reihenschaltung des Körperwiderstandes mit den beiden parallelgeschalteten Fußwiderständen maßgebend.

Der Körperwiderstand schwankt zwischen 500 und 3000 Ω . Das AIEE-Komitee hat einen mittleren Wert von 1000 Ω

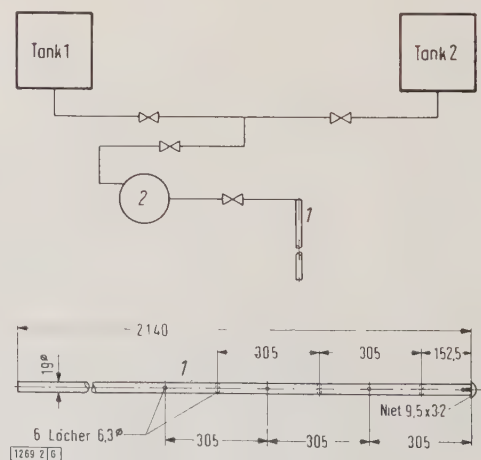


Bild 2. Schema der Einspritzvorrichtung [nach Trans. Amer. Inst. electr. Eng. (III) Bd. 79 (1960) S. 1016].

1 Einspritzrohr

2 Zentrifugenpumpe mit Benzinmotor

angenommen. Es hat ferner bei seinen Überlegungen den Erdübergangswiderstand eines Fußes dem Ausbreitungswiderstand einer kreisförmigen Plattenelektrode von rd. 16 cm Dmr. gleichgesetzt. Da der Widerstand eines Kreisplattenerders an der Oberfläche bekanntlich $R = \rho/2 D$ beträgt, worin D den Durchmesser der Platte und ρ den spezifischen Erdwiderstand bedeuten, ist der Übergangswiderstand eines Fußes unter dieser Annahme gleich rd. $3 \rho/m$.

Setzt man diesen Wert für R_F und den zeitabhängigen Ausdruck für I_t in die beiden obenstehenden Formeln ein und nimmt man für R_K den mittleren Wert 1000 Ω an, dann erhält man die folgenden zugeschnittenen Größen-gleichungen für die Schritt- und die Berührungsspannung:

Schrittspannung

$$U_S = \frac{(165 + \rho/\Omega m) V}{\sqrt{t/s}}$$

Berührungsspannung

$$U_B = \frac{(165 + 0,25 \rho/\Omega m) V}{\sqrt{t/s}}$$

Diese Gleichungen sind identisch mit den Zahlenwertgleichungen (3) und (4) aus dem erwähnten Bericht von 1958 des AIEE-Komitees.

Die zulässigen Spannungen werden also um so höher, je schlechter die Bodenleitfähigkeit ist. Nimmt man eine sehr gute Bodenleitfähigkeit von z.B. 50 Ωm an, so ergibt sich eine zulässige Berührungsspannung nach Kurve 2 in Bild 1. Zum Vergleich zeigt die Kurve 1 die nach VDE 0141/11.58 außerhalb von Anlagen zulässigen Berüh-

runnungsspannungen. Die amerikanischen Werte liegen also wesentlich höher. Bei den Schrittspannungen macht sich der Einfluß der Bodenleitfähigkeit noch stärker bemerkbar, hier liegen also die amerikanischen Werte sehr viel höher als die Werte, die nach VDE 0141 zugelassen werden.

Es wäre erwünscht, daß die VDE-Kommission 0141 diese amerikanischen Untersuchungen auf ihre Anwendbarkeit für deutsche Verhältnisse prüft. Das würde die Einführung der starren Sternpunktterdung in deutschen Hochspannungs-netzen wesentlich erleichtern.

Die Einhaltung der zulässigen Schritt- und Berührungsspannungen in Anlagen mit starrer Sternpunktterdung kann bei schlechter Bodenleitfähigkeit schwierig werden. Es ist bekannt, daß man durch chemische Behandlung des Erd-reiches den Ausbreitungswiderstand von Erdern verringern kann.

In den USA¹⁾ ist die praktische Anwendung verschiede-ner solcher chemischer Verfahren, insbesondere hinsicht-lich ihrer Dauerwirkung und der Schwankungen des Erder-widerstandes über die Jahreszeiten untersucht worden. Ver-wendet wurde Acrylamide-, Silikat- und Kupferferrocyanid Gel sowie eine Lösung von Graphit mit Wasser. Der Wider-stand dieser Chemikalien liegt zwischen 1,0 und 0,1 Ωm . Die Lösungen wurden nach Bild 2 mit einem Eisen-rohr von 19 mm Dmr. und 2,1 m Länge eingespritzt, des-sen Kopfende mit einem Niet verschlossen ist. Am Kopf-ende sind seitlich versetzt 6 Löcher von 6,3 mm Dmr. ein-gebohrt. Mit einer Zentrifugalpumpe, die von einem Benzin-motor angetrieben wird, werden die Lösungen in den Bo-

den eingespritzt. Gelegentlich tritt die Lö-sung um das Einspritzrohr herum nach oben heraus. Als Abhilfe kann man den Pumpen-druck verringern oder eine Betonkappe um das Rohr herum mit 30 cm Dmr. und unge-fähr 15 cm Tiefe anbringen. Es sind zwei Tanks vorhanden, da bei Anwendung von Kupferferrocyanid zwei Lösungen getrennt in den Boden eingespritzt werden müssen.

Die Versuche wurden mit Staberdern von 19 mm Dmr. und 2,1 m Länge an zwei ver-schiedenen Orten durchgeführt. Der Ver-suchsort A hat ungefähr 76 cm Sand auf steinigem Untergrund und der Versuchsort B sandigen Lehm-boden gleichmäßig in der ganzen Tiefe. Die Versuchsergebnisse sind in Tafel 1 zusammengestellt. Für Ver-gleichsmessungen wurde an jedem Versuchs-ort ein Staberder unbehandelt gelassen und ferner einige Staberder mit gesättigter Kochsalzlösung behandelt. Angegeben ist für jeden Staberder, wieviel der betreffen-den Lösung in den Boden eingespritzt wurde, welchen Widerstand der unbehan-delte Staberder hatte, in welchem Verhält-nis der Widerstand sich nach Behandlung verringert hat und wie sich dieses Verhält-nis im Laufe eines Jahres geändert hat. Es zeigt sich, daß die jahreszeitlichen Schwan-kungen des Erderwiderstandes bei den che-misch behandelten Staberdern wesentlich geringer als bei den unbehandelten sind. Bezüglich der Dauerhaftigkeit der Wider-standsverringering scheint die Behandlung des Bodens mit Graphit oder Kochsalz-lösung am günstigsten zu sein. In dem Be-richt selbst wird angegeben, daß die Kosten der chemischen Behandlung im allgemeinen wahrscheinlich höher sind als die für das

Tafel 1. Widerstandsverringering von Staberdern von 19 mm Dmr. und 2,14 m Länge durch chemische Behandlung.
[Nach Trans. Amer. Inst. electr. Eng. (III) Bd. 79 (1960) S. 1016.]

Versuchsort	in den Boden eingespritzte Lösung	Behandlungsart	behandelt im Jahre 1959 am	R_1	R_2/R_1	Nachmessung von R_2/R_1 am			
	1			Ω		8. Juni 1959	1. Aug. 1959	14. Nov. 1959	9. April 1960
A 76 cm Sand auf steinigem Untergrund	unbehandelt			115	1,0	1,74	2,78	4,6	2,0
	76	Acryl-amide Gel	25.4.	95	0,74	1,05	1,05	1,53	1,0
	136		10.4.	116	0,58	1,0	1,38	2,1	0,97
	136		24.4.	250	0,26	0,58	0,75	1,4	0,61
	144		11.4.	116	0,58	0,43	0,53	0,8	0,52
	144		24.4.	135	0,37	0,74	0,78	1,05	0,57
	11	Graphit und Wasser	13.8.	380	0,44	—	—	0,66	0,23
	19		13.8.	280	0,39	—	—	0,61	0,26
	76		25.8.	160	0,75	—	—	1,24	0,53
	76		25.8.	280	0,61	—	—	1,07	0,47
	4	ge-sättigte Kochsalz-lösung	23.6.	460	0,31	—	0,26	0,39	0,22
	8		23.6.	580	0,27	—	0,19	0,3	0,12
	30		11.4.	220	0,26	0,36	0,52	0,38	0,5
	38		23.6.	1750	0,07	—	0,05	0,08	0,03
	80		23.6.	126	0,56	—	0,47	0,66	0,27
	100		23.6.	320	0,28	—	0,19	0,27	0,1
	106		11.4.	160	0,26	0,32	0,4	0,58	0,29
	415		23.6.	1050	0,06	—	0,04	0,06	0,03
B sandiger Lehm-boden	unbehandelt			52	1,0	—	—	1,6	1,73
	150	Acryl-amide Gel	10. 8.	99	0,6	—	—	1,24	1,0
	57			78	0,53	—	—	0,83	0,96
	150	Silikat Gel	3.10.	38	0,53	—	—	0,83	0,9
	57			Kupferferrocyanid Gel	10. 8.	85	0,47	—	—
	8	Graphit und Wasser	3.10.	50	0,7	—	—	0,88	0,7
	38		11. 8.	68	0,75	—	—	1,8	1,47
	38		3.10.	85	0,51	—	—	0,65	0,41
	38		3.10.	38	0,79	—	—	0,95	0,84
	76		3.10.	45	0,71	—	—	0,96	0,82
	150		3.10.	65	0,46	—	—	0,58	0,54
	150		gesättigte Kochsalz-lösung	7. 8.	33	0,61	—	—	0,7

1) Clark, R. J., und Watkins, B. O.: Einige chemische Verfahren zur Verringerung des Ausbreitungswiderstandes von Erdern. (Some chemical treatments to reduce the resistance of ground connections.) Trans. Amer. Inst. electr. Eng. (III) Bd. 79 (1960) S. 1016-1023.

Eintreiben tiefer Staberder. Die chemischen Verfahren werden nur bei sehr schlechter Bodenleitfähigkeit wirtschaftlich sein. Vermerkt sei, daß die Anwendung des Silikat Gels und des Kupferferrocyanid Gels in Amerika durch Patente geschützt ist.

W. Koch, Berlin: H. Baatz hat in seinem Vortrag berichtet, daß in den USA Körperströme bis 520 mA für 0,1 s Dauer zugelassen werden. G. Boll hat seiner Zeit im Auftrage der VDE-Kommission 0141 zur Festlegung der zulässigen Berührungs- und Schrittspannungen die Versuche von Ch. F. Dalziel ausgewertet [1]. Daher sind die Kurven in diesen Vorschriften auf Grund ähnlicher Formulierungen, wie sie hier dargelegt wurden, zustande gekommen. Nach VDE 0141/11. 58, § 27, beträgt die zulässige Berührungsspannung innerhalb von Anlagen 340 V während 0,1 s. Die Kurven sind unter Zugrundelegung eines Körperwiderstandes von 900 Ω aufgestellt (die Amerikaner haben 1000 Ω angenommen). Man kommt dann auf Körperströme bei Berührung mit beiden Händen von etwa 380 mA.

Ich empfehle jedem, diese Versuche einmal an sich selbst durchzuführen. Für die Schrittspannung sind während 0,1 s auch 340 V zugelassen, also derselbe Wert wie für die Berührungsspannung. Nun weiß man, daß die Stromempfindlichkeit des Körpers bei Stromdurchgang durch die Beine nur etwa ein Fünftel derjenigen bei Stromfluß über die Arme beträgt. Ich bin daher seinerzeit in der VDE-Kommission 0141 immer dafür eingetreten, die zulässige Schrittspannung heraufzusetzen. Wenn man nun, um die Anlagen zu verbilligen, die zulässige Berührungsspannung erhöht, kann das bei der zulässigen Schrittspannung auch geschehen. Was das bedeutet, möchte ich kurz schildern.

Ich habe im Jahre 1951 Versuche an mir selbst gemacht und die Ergebnisse veröffentlicht [2]. Die VDE-Kommission 0141 hat sich in dankenswerter Weise dem angeschlossen, ich habe darüber 1956 auf der Tagung der Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen schon einmal berichtet. Von den Kommissionsmitgliedern ist einer nach dem anderen auf den „elektrischen Stuhl“ getreten, und jeder wollte mit zusammengebißenen Zähnen die anderen übertrumpfen. Als Vorsitzender der Kommission habe ich aus Ehrgefühl die Versuche bei den Siemens-Schuckert-Werken noch weitergetrieben. Ich habe mich mit nackten Füßen auf zwei Plattenelektroden gestellt, die mit salzwassergetränkten Lappen bedeckt waren, und wir haben den Strom oszillographisch aufgenommen. Bei 70 V an den Füßen betrug der Strom 23,6 mA, das ist kein erheblicher Strom. Wenn man ihn allerdings über die Arme leiten würde, hinge man an den Elektroden fest. Bei 110 V waren es 40,8 mA, bei 125 V rd. 42 mA, also noch nicht einmal ein Zehntel dessen, was zuzulassen empfohlen werden soll.

Das Ergebnis der Selbstversuche war folgendes: Ich bin dabei nicht zu Tode gekommen. Aber man schnellte bei einem so hohen Körperstrom unwillkürlich in die Höhe, weil sich die Beinmuskeln verkrampfen und den Körper auf die Zehenspitzen stellen. Dadurch vergrößert sich der Ausbreitungswiderstand der Fußsohlen und der Strom nimmt etwas ab. Ich wollte vor allem feststellen, ob man dabei hinfällt, denn das war die Vorstellung der Kommission, daß der Körper durch die erhöhte Schrittspannung zum Fallen kommt und nun eine größere Spanne am Erdboden abgreift, wodurch die Berührungsspannung erheblich höher würde als auf 1 m bezogen. Ich bin bei diesen Versuchen nicht hingefallen, denn ich konnte meine Knie völlig frei bewegen. Trotzdem habe ich die Versuche nicht mit noch höheren Strömen fortgeführt, weil mir der Stromdurchgang zu weh tat.

Die amerikanischen Versuche an Tieren — es waren größtenteils Schafe — sind mit der Absicht gemacht worden, festzustellen, wieviel Prozent der Tiere bei höchsten

Körperströmen am Leben bleiben. Dabei wurden 0,5 % der Versuchstiere getötet. Über das Befinden der überlebenden Tiere in der Folgezeit ist in dem Aufsatz von Dalziel nichts ausgesagt. Es ist aber bei einer Beanspruchung bis hart an die Todesgrenze durchaus wahrscheinlich, daß die Tiere gesundheitliche Folgeschäden erlitten haben, die man also für einen Menschen dann ebenso annehmen muß. Die Tiere sind sicherlich später geschlachtet worden. Um die Folgen der Versuche hat sich anscheinend niemand gekümmert. Daher kann man meines Erachtens aus den Ergebnissen dieser Tierversuche nicht ohne weiteres auf die Gefährdung der Gesundheit von Menschen schließen. Deshalb muß empfohlen werden, und das möchte ich betonen, daß viel mehr Personen solche Versuche an sich selbst durchführen lassen, denn wenn es schlimm kommt, soll ja ein Mensch solch hohe Körperströme ertragen. Wir werden in der VDE-Kommission 0141 bei Gelegenheit die aufgeworfenen Fragen besprechen müssen.

Nun ein anderer Punkt. Es besteht offenbar die Neigung, auch Netze unter 110 kV mittelbar oder unmittelbar zu erden, das ist ja ein Thema der heutigen Tagung. Die VDE-Kommission hat, als nach dem Kriege die Sternpunktterdung insbesondere für die 380-kV-Anlagen geplant wurde, die Vorschriften VDE 0141 aus dem Jahre 1940 umgearbeitet und auf die Sternpunktterdung erweitert. Im Laufe der Kommissionsberatungen, die sich immerhin einige Jahre hinzogen, wurde die Sternpunktterdung bei den bestehenden 220-kV-Anlagen durchgeführt, so daß wir diese auch in die Betrachtungen einbeziehen mußten und nun als untere Grenze für die Anwendbarkeit der Leitsätze für die Bemessung von Erdungen 110 kV ansetzten, weil solche Anlagen hinsichtlich der Isolation und Verschmutzung sorgfältiger überwacht und mit einem besseren Relaischutz ausgerüstet sind, als irgendwelche Mittelspannungsanlagen es sein können. Man hat also zunnächst einmal diese Grenze gezogen, lediglich um abzuwarten, wie die Entwicklung weitergeht und welche Erfahrungen mit den geerdeten Höchstspannungsanlagen gemacht werden. Diese sind heute fast zehn Jahre oder doch eine Reihe von Jahren im Betrieb und es hat sich gezeigt, daß die Befürchtungen, die man zum Teil hatte, nicht berechtigt waren. Daher könnte man erwägen, auch Anlagen unter 110 kV unter erleichternden Bedingungen, nämlich ohne Beschränkung der Erderspannung, für die Sternpunktterdung freizugeben. Für Kabelnetze ist das meines Erachtens ohne weiteres zulässig, denn man läßt ja auch zu, daß in Hochspannungskabelnetzen die Nullleiter-Erdung mit der Hochspannungs-Schutzerdung verbunden wird, weil man aus Erfahrung weiß, daß bei Doppelerdschlüssen im Hochspannungsnetz gefährliche Spannungen am Nulleiter nicht zu erwarten sind.

Bei Freileitungsnetzen ist das etwas anderes. Nun besteht aber der Vorschlag, die Erdschlußlöschung beizubehalten und die Erdschlußspule kurzzeitig zu überbrücken, damit man nichtlöschende Erdschlüsse abschalten kann. Man könnte dann die Bestimmung, daß die Erderspannung bei Erdschluß in Anlagen unter 110 kV nicht höher als 125 V sein darf, unter dieser Voraussetzung fallenlassen. Denn für den Doppelerdschluß beschränkt man diese Spannung ja auch nicht. Da die Erfahrung gezeigt hat, daß nur 0,5 % der Erdschlüsse in Doppelerdschlüsse übergehen, würde sich die Zahl der kurzschlußartigen Erdfehler zwar etwas erhöhen, wenn man den einfachen Erdschluß hin und wieder in einen kurzzeitigen Erdschluß überführt. Aber dies ist grundsätzlich unbedeutend, auch wenn jene Erfahrungszahl statt 0,5 % selbst 2 % wäre. Die VDE-Kommission 0141 hätte somit die Aufgabe, die Vorschriften im obigen Sinne zu erweitern.

Schrifttum

- [1] Boll, G.: Zur Frage der zulässigen Berührungs- und Schrittspannungen in Anlagen über 1 kV. ETZ-A Bd. 73 (1952) S. 253—256.
- [2] Koch, W.: Zur Frage der Schrittspannung in Hochspannungsanlagen. Siemens-Z., Bd. 26 (1952) S. 249—252. (Dazu erweiterter Sonderdruck SSW 500.15/209; 858 2 TS 12.)

O. Poßner, Frankfurt a. M.: Wie aus den Ausführungen von R. Mestermann, M. Erich und M. Honnens hervorging, ist der wesentlichste Anreiz, Mittelspannungs-Kabelnetze dauernd oder teilweise mit niederohmig geerdetem Sternpunkt zu betreiben, dadurch gegeben, daß durch diese Maßnahme die Schwierigkeiten der Erdschlusssuche in Netzen mit Erdschlußkompensation vermieden werden; die Erdschlüsse werden in Erdkurzschlüsse umgewandelt, die dann vom eigentlichen Netzschutz abzuschalten sind. Die Aufgaben der Netzschutzrelais werden damit auf die Erfassung auch der Erdkurzschlüsse erweitert. Es besteht nun der verständliche Wunsch, den Aufwand für diese Relais nicht wesentlich gegenüber dem für den Relaischutz in kompensierten Netzen zu erhöhen.

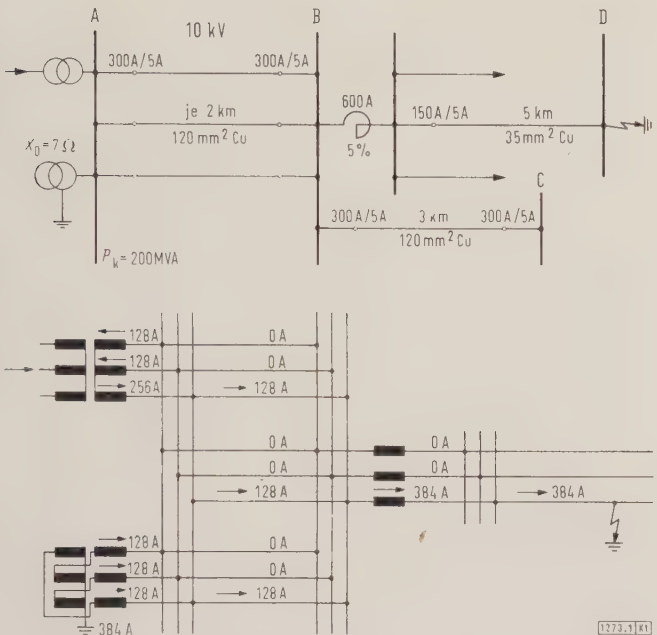


Bild 1. Beispiel für die Verteilung des Erdkurzschlußstromes in einem 10-kV-Netz mit niederohmiger Sternpunktterdung bei Einspeisung und Sternpunktterdung nur in Station A.

In kompensierten Mittelspannungsnetzen haben sich Schnelldistanzrelais in verhältnismäßig einfacher und gedrängter Bauart mit nur zweiphasiger Überstromanregung, Einrelais-Schaltung mit Auswahlhilfsrelais und Wandlerstrombetätigung eingeführt und gut bewährt. Es liegt auf der Hand, daß diese Relais ohne Änderung nicht auch einpolige Erdkurzschlüsse mit erfassen können, weil sie nur durch die Ströme in den Leitern R und T angeregt werden und deshalb die Fehler im Leiter S nicht abschalten würden. Aber auch die Überstromanregung, die wegen der Wandlerstrombetätigung der Relais nicht durch eine Unterimpedanzanregung ergänzt werden kann, bringt zusätzliche Probleme, die ich an einigen Lichtbildern und Zahlenwerten kurz erläutern möchte:

Bild 1 zeigt ein einfaches 10-kV-Kabelnetz, das von der Station A aus eingespeist wird. In dieser Station soll sich auch die Sternpunktterdung über eine niederohmige Impedanz befinden, die so bemessen ist, daß bei Sammelschienenerschuß in A ein Erdkurzschlußstrom von 800 A fließt. Von A führen drei parallele Kabel zur Station B, deren zweite Sammelschiene über eine Kurzschlußdrosselspule geschützt wird. Von dieser Schiene führt ein schwächeres Kabel zur Station D. Bei einem Erdkurzschluß in D tritt dann ein Erdkurzschlußstrom von 384 A auf. Man erkennt, daß dieser Strom zwar noch zur Anregung der Überstrom-Annege-relais im Kabel selbst (150 A/5 A-Wandler) ausreicht, aber nicht mehr für die Relais in den parallelgeschalteten Speise-

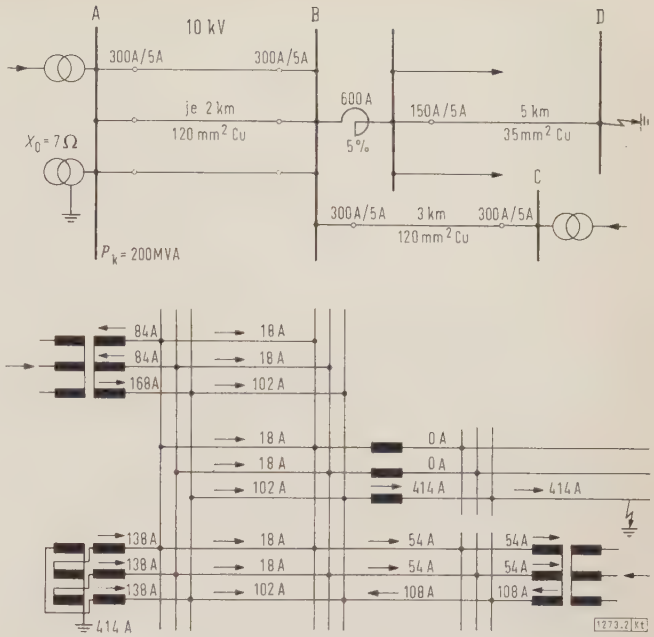


Bild 2. Beispiel für die Verteilung des Erdkurzschlußstromes in einem 10-kV-Netz mit niederohmiger Sternpunktterdung bei Einspeisung in den Stationen A und C sowie mit Sternpunktterdung nur in Station A.

kabeln (300 A/5 A). Ein Reserveschutz ist also nicht vorhanden.

Bild 2 zeigt den gleichen Fall, jedoch ist jetzt noch eine zweite Einspeisung in Station C mit gleicher Einspeisleistung vorhanden. Der Erdkurzschlußstrom erhöht sich jetzt von 384 auf 414 A. Der Reserveschutz regt aber ebenfalls nicht an. Bemerkenswert ist ferner, daß von der zweiten Einspeisung her jetzt auch in den gesunden Leitern Ströme fließen, die allerdings bei der angenommenen Fehlerlage noch nicht zu falschen Anregungen führen. Ferner fehlt im Speisekabel von C der Summenstrom.

Bild 3 zeigt schließlich den gleichen Fehlerfall im gleichen Netz, bei dem jedoch jetzt auch eine niederohmige Sternpunktterdung in der zweiten Einspeisung in C vor-

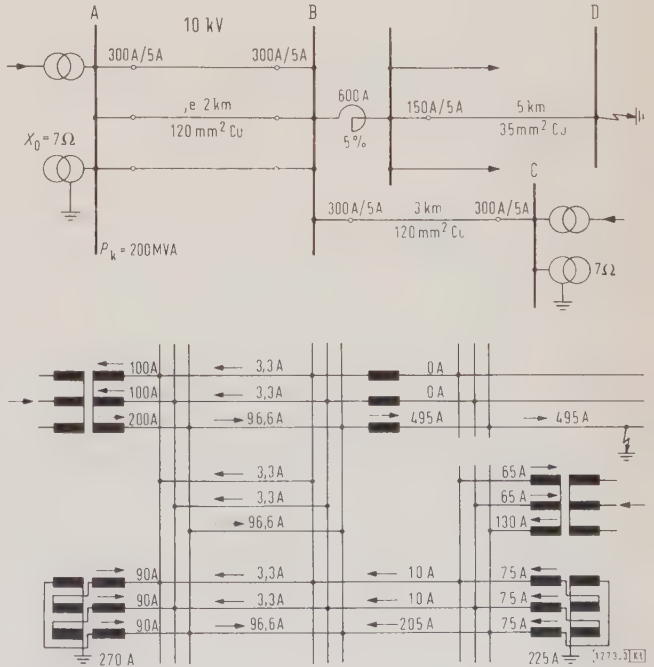


Bild 3. Beispiel für die Verteilung des Erdkurzschlußstromes in einem 10-kV-Netz mit niederohmiger Sternpunktterdung bei Einspeisung und Sternpunktterdung in den Stationen A und C.

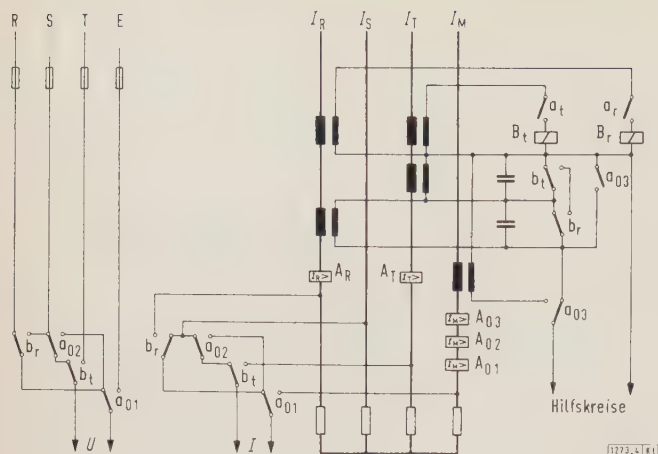


Bild 4. Schaltung der Anrege- und Auswahlglieder des Schnellstanzschutzes SD 14 E für Netze mit geerdetem Sternpunkt.

handen ist. Der Erdkurzschlußstrom steigt jetzt auf knapp 400 A; die Ströme in den gesunden Leitern sinken auf kleine Ausgleichsströme herab. Noch immer versagt aber jeder Reserveschutz.

Eine Verkleinerung der Erdungsreaktanzen bringt aber leider keine wesentliche Verbesserung. Wird im ersten Fall (einseitige Einspeisung nur von A) der Einspeisetransformator unmittelbar geerdet, so steigt der Erdkurzschlußstrom bei einem Fehler in D von 384 A nur auf 516 A. Allerdings würde er bei einem Fehler auf der Sammelschiene in A von etwa 800 auf fast 7000 A steigen. Der Vorteil dieser Art Erdung ist also der, daß der Erdkurzschlußstrom im ganzen Netz auf erträgliche Werte herabgedrückt wird. Schuld an den verhältnismäßig kleinen Erdkurzschlußströmen in Kabelnetzen, insbesondere an speisepunktfernen Stellen, sind die großen Kabelnullimpedanzen, die, wie Messungen ergeben haben, etwa den zehnfachen Wert der Mitimpedanz haben; damit wird der Erdkurzschlußstrom im Kabelnetz bis auf etwa den vierten Teil eines zweipoligen Kurzschlußstromes an der gleichen Stelle herabgedrückt.

Die Folgerungen aus diesem Verhalten für den Schutz sind:

1. Netzkonstellationen mit sich immer mehr verästeln den Leitungen sollten vermieden werden. Statt dessen sind einfache Ringmaschen, nicht zu lang, anzustreben.
2. Die Erdungspunkte sind in jeder Einspeisung, aber nur dort, anzulegen.

Wenn so von der Netzseite für klare Anregeverhältnisse gesorgt ist, können nur wenig modifizierte Distanzrelais der herkömmlichen Bauart verwendet werden.

Bild 4 zeigt am Beispiel des bekannten AEG-Schnellstanzschutzes SD 14, wie diese Modifikation aussieht. Das Relais erhält eine kleine Zusatzeinrichtung im getrennten Gehäuse, die eine weitere Summenstromanregung und einen Sättigungswandler im Summenstrompfad enthält. Die Arbeitsweise des Relais ist dann folgende: Bei jedem Erdkurzschluß, kenntlich durch Auftreten eines Summenstromes, werden die „Hilfsbetriebe“, d. h. Zeitrelais und Auslöse-relais, vom Sättigungswandler im Summenstrompfad gespeist. Der Fehler auf Leiter S wird daran erkannt, daß in diesem Falle nur die Summenstromanregung anspricht, während bei den Erdfehlern R—E und T—E auch die diesen Leitern zugeordneten Überstromanregungen mit ansprechen. Bei Erfüllung der obigen Netz Voraussetzungen ist der Summenstrom ja stets praktisch gleich dem Leiterstrom, so daß Fehlanregungen bei Erdfehlern R—E und T—E

(z. B. nur Summenstromanregung und damit Orientierung auf S) nicht möglich sind.

Der Nebenschlußwiderstand im Summenstrompfad ist natürlich den in Kabelnetzen vorhandenen Nullimpedanzen anzupassen. Solche Relais sind u. a. in den 10-kV-Netzen der Stadtwerke Hannover, aber auch in Holland, Belgien und England seit Jahren erfolgreich in Betrieb.

H. Bollmann, Erlangen: R. Mestermann erwähnte in seinem Vortrag die günstige Wirkung von Kabeln auf die Lösbedingungen für Lichtbogenerdschlüsse in Netzen mit Erdschlußstromkompensation. Es wurde auf den Vorschlag hingewiesen, den mit Rücksicht auf die Beeinflussung von Fernmeldeleitungen zulässigen Grenzreststrom von 1 A je Kilovolt Betriebsspannung für die Netze auf 1,2 bis 1,5 A zu erhöhen. Als Ursache für dieses günstige Verhalten wird die bei Kabelnetzen sehr langsam wiederkehrende Spannung an der Fehlerstelle genannt. In diesem Zusammenhang möchte ich kurz über das Ergebnis von Erdschlußversuchen im 110-kV-Kabelnetz der Stadtwerke Bremen berichten, bei denen auch der Verlauf der wiederkehrenden Spannung an der Fehlerstelle untersucht wurde.

Die Versuche wurden seinerzeit durchgeführt, um die Höhe des Wirk-Reststromes in 110-kV-Kabelnetzen mit Erdschlußstromkompensation zu ermitteln, da Meßwerte für diese Größe nicht bekannt waren. Das Netz hatte eine Gesamtlänge von 32,9 km mit einem Erdschlußstrom von 560 A.

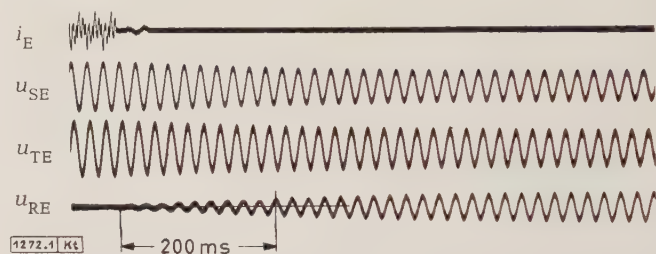


Bild 1. Oszillogramm des Erdschlußstromes i_E und der Leitererdspannungen u_{SE} , u_{TE} und u_{RE} beim Einschwingen der Spannung an der Fehlerstelle nach dem Löschen des Erdschlußstromes bei einem bezogenen Wirkstrom $i_W = 2,29\%$ und einer Verstimmung $v = 0$ in einem 110-kV-Kabelnetz.

Im Netz waren fünf Löschspulen mit Nennströmen zwischen 85 und 200 A verteilt. Der auf den kapazitiven Erdschlußstrom bezogene Wirk-Reststrom betrug bei guter Abstimmung im Mittel $i_W = 2,1\%$, je nach Einsatz der verschiedenen Löschspulen. Versuche mit einem Teilnetz von 21,7 km Länge und 258 A unkompenziertem Erdschlußstrom ergaben Werte um $2,3\%$.

Wie erwähnt, wurde bei den Versuchen auch die wiederkehrende Spannung an der Fehlerstelle untersucht, die neben der Höhe des Reststromes die Lösbedingungen für den Erdschlußlichtbogen entscheidend beeinflusst. Auf diesen Einfluß wurde schon von Eaton⁴⁾ hingewiesen, der in Netzversuchen festgestellt hat, daß die Zeit bis zum Löschen des Erdschlußfehlers von der Steilheit der wiederkehrenden Spannung abhängt. Das Oszillogramm im Bild 1 zeigt den Verlauf der wiederkehrenden Spannung für das gut kompenzierte Netz. Der bezogene Wirk-Reststrom betrug bei diesem Versuch rd. $2,3\%$. Die Spannung steigt sehr langsam auf den stationären Wert der Leitererdspannung im fehlerfreien Betrieb an. Die wiederkehrende Spannung ist die Differenz der stationären Leitererdspannung und einer Ausgleichsschwingung des Nullsystems mit dessen Eigen-

⁴⁾ Beeinflussung der Lichtbogenlöschung in einer Anlage mit Petersenspulen. ETZ Bd. 61 (1940) S. 859—860. Nach J. R. Eaton: Electr. Engng. Bd. 58 (1939) S. 576.

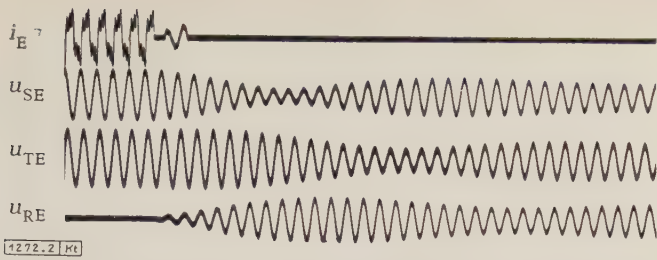


Bild 2. Oszillogramm des Erdschlußstromes i_E und der Leitererdspannungen u_{SE} , u_{TE} und u_{RE} beim Einschwingen der Spannung an der Fehlerstelle nach dem Löschen des Erdschlußstromes bei einem bezogenen Wirkstrom $i_W = 2,29\%$ und einer Verstimmung $v = 9\%$ in einem 110-kV-Kabelnetz.

frequenz. Beim gut kompensierten Netz ist die Eigenfrequenz des Nullsystems abgestimmt auf die Betriebsfrequenz des Netzes. Nach dem Entstehen des Fehlers ist die wiederkehrende Spannung zunächst Null, da sich die stationäre Betriebsspannung und die Ausgleichsspannung gegenseitig aufheben. In der Folge steigt sie in dem Maße an, wie die Ausgleichsspannung des Nullsystems abklingt und erreicht schließlich den stationären Wert der Leitererdspannung.

Im fehlkompensierten Netz ist die Eigenfrequenz des Nullsystems größer oder kleiner als die Betriebsfrequenz, je nachdem ob das Netz überkompensiert oder unterkompensiert betrieben wird. In diesem Fall treten zwischen der stationären Betriebsspannung und der Ausgleichsspannung Schwebungen auf, wodurch die Spannung an der Fehlerstelle schneller ansteigt und den stationären Wert erheblich überschreitet. Bild 2 zeigt den Verlauf der wiederkehrenden Spannung für das gleiche Netz bei etwa 9% Verstimmung.

Aus den Versuchen ergeben sich einige Gesichtspunkte für den Betrieb von 110-kV-Netzen mit Erdschlußstrom-Kompensation und größeren Kabellängen. Dazu wurden die Hüllkurven der Einschwingspannung an der Fehlerstelle für zwei verschiedene bezogene Wirkrestströme und für Verstimmungen zwischen 0 und 20% errechnet und im Bild 3 dargestellt. Die Kurven sind nur einseitig bis zum ersten Maximum der Schwebung dargestellt. Die vollständigen Hüllkurven ergeben sich durch die spiegelbildliche Ergänzung der gezeichneten Kurvenschar. Die Kurvenschar in Bild 3a für $i_W = 2\%$ zeigt nach den vorausgegangenen Ausführungen etwa die Verhältnisse in einem reinen 110-kV-Kabelnetz, während die Kurvenschar in Bild 3b etwa für ein reines 110-kV-Freileitungsnetz zutrifft.

Für das gut kompensierte Netz mit $v = 0$ ist der günstige Einfluß der Kabel auf die wiederkehrende Spannung aus den dargestellten Kurven klar zu erkennen. Man darf auf Grund dieser Verhältnisse annehmen, daß ein freibrennender Lichtbogen im Kabelnetz leichter erlischt als im Freileitungsnetz bei gleichem Reststrom. Bei ge-

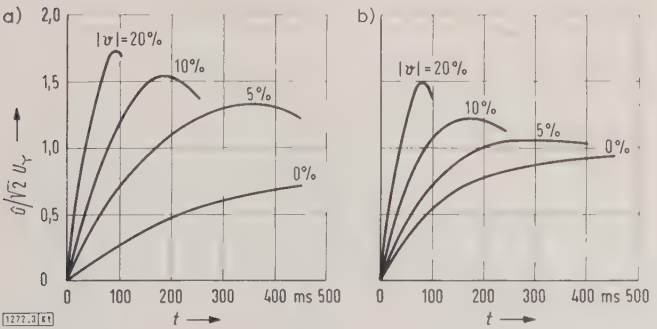


Bild 3. Hüllkurven der wiederkehrenden Spannung am Erdschlußort bei verschiedenen Verstimmungen v .
a) bezogener Wirkstrom $i_W = 2\%$, b) bezogener Wirkstrom $i_W = 5\%$.

mischem Betrieb von Kabeln und Freileitungen können die Löschbedingungen durch den Einfluß der Kabel gegenüber dem reinen Freileitungsnetz verbessert werden, obwohl der Reststrom durch die Kabel etwas größer wird. Das kann bei der galvanischen Kopplung eines größeren verkabelten Stadtnetzes mit einem Landesnetz von Bedeutung sein, wenn der Erdschlußreststrom des Landesnetzes an der Grenze des auf Grund der Betriebserfahrungen zulässigen Wertes liegt. Die Hüllkurve der wiederkehrenden Spannung liegt dann je nach dem Verhältnis von Freileitungszur Kabellänge zwischen den beiden dargestellten Kurven für $i_W = 2\%$ und 5% .

Will man diesen günstigen Einfluß der Kabel ausnutzen, so muß, wie die Kurven zeigen, die Verstimmung im Netz klein gehalten werden. Der Einfluß der Verstimmung auf den Verlauf der wiederkehrenden Spannung ist um so geringer, je größer der bezogene Wirk-Reststrom eines Netzes ist. Während im Freileitungsnetz eine Verstimmung von 5% den Verlauf der wiederkehrenden Spannung kaum beeinflusst, ist im Kabelnetz bei gleicher Verstimmung der Einfluß wesentlich größer. In Mittelspannungsnetzen mit bezogenen Wirk-Restströmen zwischen 5% und 10% wird sich die Verstimmung noch weniger auswirken. Für das 110-kV-Kabelnetz verläuft die wiederkehrende Spannung bei Verstimmung jedoch ungünstiger als im Freileitungsnetz. Daraus ergeben sich für Netze mit kleinen bezogenen Wirk-Restströmen strengere Forderungen für die genaue Abstimmung der Kompensation. Unter anderem werden mit Rücksicht auf Unsymmetriespannungen, die bei guter Abstimmung durch Resonanzüberhöhung zu Sternpunktverlagerungen führen, die Netze gern etwas fehlkompensiert betrieben. Das kann sich auf Grund der vorangegangenen Überlegungen bei kleinen bezogenen Wirkrestströmen ungünstig auswirken. Dazu ist zu bemerken, daß die Unsymmetriespannungen in Netzen mit Kabeln durch die stark symmetrierende Wirkung der Kabel gering sind und eine Fehlkompensation aus diesen Gründen nicht so notwendig scheint.

Zusammenfassend läßt sich aus den Erdschlußversuchen folgern, daß bei den geringen bezogenen Wirk-Restströmen in 110-kV-Kabelnetzen von 2 bis 2,3% die wiederkehrende Spannung am Fehlerort wesentlich günstiger verläuft als im Freileitungsnetz und daß Kabel in Freileitungsnetzen die Löschbedingungen verbessern können. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß die Abstimmung der Kompensation sorgfältig überwacht wird.

Zum Schluß möchte ich den Stadtwerken Bremen nochmals dafür danken, daß sie uns Gelegenheit gaben, diese Versuche durchzuführen.

K.-H. Feist, Erlangen: Wie in verschiedenen Vorträgen zum Ausdruck kam, wirkt sich eine Sternpunktterdung oder die Art der Sternpunktterdung von Mittelspannungsnetzen erheblich auf die Bemessung der Erdungsanlagen aus. Die Sternpunktbehandlung beeinflusst

1. den erforderlichen Aufwand an Erdern,
2. die Querschnitte der sogenannten Erdungsleitungen, d. h. der außerhalb des Erdreiches oder isoliert im Erdreich verlegten Leitungen der Erdungsanlage,
3. Maßnahmen der Trennung bzw. des Zusammenschlusses von Erdungen,
4. Art und Umfang der notwendigen Kontrollmessungen.

Von W. Koch war erwähnt worden, daß in dieser Hinsicht noch eine Lücke in den VDE-Bestimmungen geschlossen werden muß; denn VDE 0141/11.58 enthält Leitsätze

über die Bemessung von Erdungsanlagen bei unmittelbarer Sternpunktterdung oder bei Sternpunktterdung über strombegrenzende Widerstände nur für die Netze ab 110 kV [1]. Die für die unmittelbar geerdeten Netze ab 110 kV geforderte Schnellabschaltung [2] wäre sinngemäß auch für Netze mit Sternpunktterdung über strombegrenzende Widerstände ab 110 kV und unter 110 kV notwendig, wobei ja bei der Erdung über induktive strombegrenzende Widerstände noch mit Erdkurzschlußströmen bis zu mehreren Kiloampere gerechnet werden muß.

In Mittelspannungskabelnetzen mit starker Erdkurzschlußstrom-Begrenzung, z. B. auf 600 bis 1000 A, wird die Erderspannung im allgemeinen den Wert der zulässigen Berührungsspannung nach Bild 7 in VDE 0141 nicht überschreiten. Diese Erderspannung wäre zu messen. Es braucht dann jedoch nicht eine Vielzahl von Schritt- und Berührungsspannungen überwacht zu werden. Nur ein Wert, die Erderspannung, ist also festzustellen.

In Mittelspannungs-Freileitungsnetzen mit starker Erdkurzschlußstrom-Begrenzung müßte man bei neuen Anlagen die Form der Erdungsanlage hinreichend genau vorschreiben. Diese Aufgabe ergab sich bereits für die projektieren-

höchstens gleich dem Wert der größten Potentialdifferenz zwischen dem Erdboden in der Masche (nach dieser Darstellung) und dem Maschenerder. Die größten Schrittspannungen, d. h. die stärksten Änderungen des Potentials, befinden sich außerhalb des äußeren Randes des Erdungsmaschennetzes. Steigert man die Erderspannung des Erdungsmaschennetzes durch Vergrößerung der Strombelastung, so werden schließlich die Werte der zulässigen Berührungsspannung an den Geräten nach Bild 7 in VDE 0141 und die Werte der zulässigen Schrittspannung nach Bild 8 der gleichen VDE-Bestimmungen erreicht.

Diejenige Erderspannung, bei der die genannten Grenzwerte der Schritt- und Berührungsspannung erreicht werden, ist also ein Grenzwert der Einsetzbarkeit dieser Anordnung. Bei höheren Erderspannungen muß man durch zusätzliche Erder die Erdungsanlage verbessern, z. B. durch tieferliegende Steuererder vor dem Anlagenrand und durch Verringerung der Maschenweite. Die Berührungsspannungen an einer parallel zum Rand der Erdungsanlage geführten metallenen Anlagenumzäunung, die an die Erdung angeschlossen ist, können auch einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten, nämlich nicht die Differenz zwischen dem Potential des Erdungsnetzes und demjenigen Erdoberflächenpotential, das am Standort des Berührenden auftreten würde, wenn kein Zaun vorhanden wäre. Voraussetzung für die Gültigkeit solcher Betrachtungen ist, wie erwähnt, daß das elektrische Strömungsfeld in dem betrachteten Geländeabschnitt vor dem Zaun nicht durch andere metallische Leiter gestört ist, z. B. vom benachbarten Ort kommende metallische Wasserleitungen. Bei der Erweiterung vorhandener Anlagen und höherer Erderspannung wird eine stichprobenweise Feststellung der Schritt- und Berührungsspannungen kaum zu umgehen sein, was natürlich eine Erschwerung darstellt.

Da die Netze bis 110 kV Nennspannung gegenüber den 220- und 380-kV-Netzen die Besonderheit haben, daß sie sowohl Freileitungen als auch Kabel enthalten können, sind bei einem bestimmten Erdungswiderstand der Erdungsanlage eines Umspannwerks sehr verschiedene Werte des Quotienten Erderspannung/Fehlerstrom möglich. Die Erderspannung wird hier nämlich etwa errechnet, indem der Erdungswiderstand der Station mit der Summe der mittels Reduktionsfaktor reduzierten Nullströme der Hauptleiter der eingeführten Leitungen multipliziert wird [3]. Also muß z. B. zunächst bei dem in Bild 2 gezeigten Netz die Summe der Nullströme der Hauptleiter der Freileitung mit dem von der Beeinflussungsberechnung hier bekannten Reduktionsfaktor r_{Fr} dieser Leitung multipliziert werden. Die Nullstromsumme des Kabels A ist mit dem Reduktionsfaktor r_{KA} dieses Kabels zu multiplizieren usw. Zur Berechnung der Erderspannung sind die so reduzierten und phasengerecht

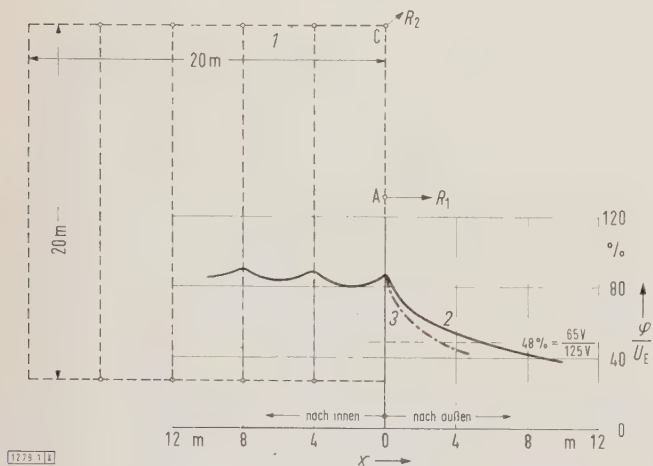


Bild 1. Verlauf des auf die Erderspannung U_E bezogenen Erdbodenpotentials φ über einem kleinen Erdungsmaschennetz bei Erdschluß.
1 50 cm tief verlegter Bänderer mit Ersatzdurchmesser 2 cm
2 Verlauf in Meßrichtung R_1
3 Verlauf in Meßrichtung R_2
x Abstand von dem über dem äußersten Erdungsstand gelegenen Punkt A bzw. C
größte Schrittspannung bei unendlich großem Körperwiderstand auf $R_2 = 22 \%$, auf $R_1 = 17 \%$ der Erderspannung

den Firmen bei der Erstellung von Anlagen in Entwicklungsländern, wenn dort z. B. Netzsternpunkte in 11-kV-Netzen über strombegrenzende Widerstände geerdet waren und wenn der Potentialverlauf im Boden noch allein durch die einzubringenden Erder und Teile der elektrischen Anlagen bestimmt werden konnte, weil noch keine anderen Metallteile im Boden lagen. Der Kunde verlangte vielfach die Einhaltung von VDE-Bestimmungen. Man konnte aber die für andere Fälle gedachten VDE-Bestimmungen hier nur sinngemäß anzuwenden versuchen. Das soll an einem Beispiel erläutert werden.

Bild 1 zeigt den Potentialverlauf an der Erdoberfläche über einem kleinen Erdungsmaschennetz, wie er im elektrolitischen Trog ermittelt wurde, und der außer für einen bestimmten Anwendungsfall deshalb interessant war, weil bei kleinen Erdungsmaschennetzen die Schritt- und Berührungsspannungen einen besonders großen Anteil der Erderspannung darstellen. Schließt man an das Erdungsmaschennetz die Geräte einer Freiluftschaltanlage an, so werden die Berührungsspannungen an diesen Geräten

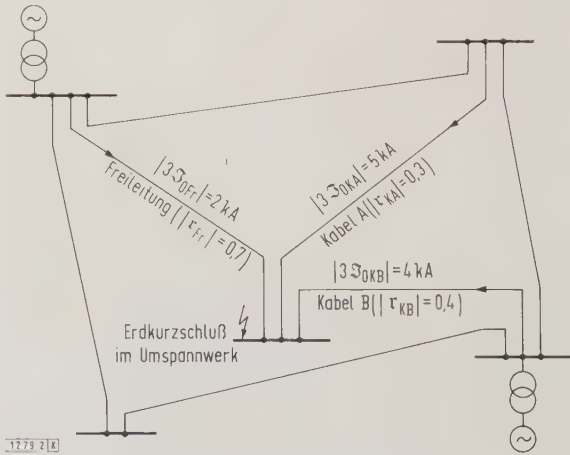


Bild 2. Ausschnitt aus einem Netzplan mit Angabe der der Fehlerstelle zufließenden Summe der Nullströme.

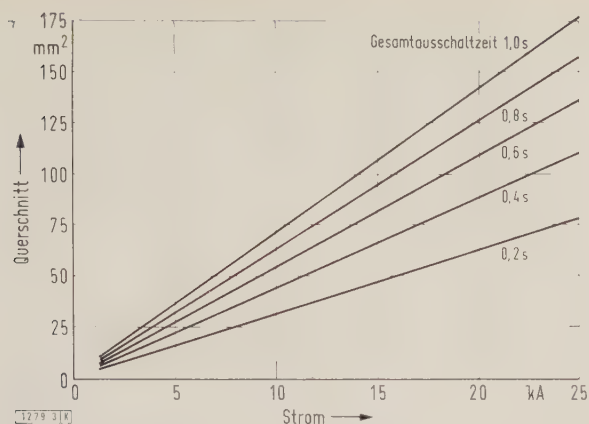


Bild 3. Erforderlicher Querschnitt von Erdungsleitungen aus Kupfer bei Anlagen in Netzen mit unmittelbarer Sternpunktterdung oder mit Sternpunktterdung über strombegrenzende Widerstände (bei Endtemperatur 150 °C, Temperatur zu Beginn des Kurzschlusses 20 °C). Das Bild gilt nicht für Vorrichtungen zum Erden und Kurzschließen.

zusammengesetzten Ströme dann mit dem Erdungswiderstand zu multiplizieren. Für die Nullstromsummen $3I_{0Fr}$, $3I_{0KA}$ und $3I_{0KB}$ im Bild 2 kann man natürlich auch die Summe der Ströme in den Hauptleitern R, S, T der jeweiligen Leitung einsetzen. Die Erderspannung für das Umspannwerk mit Erdschluß ergibt sich aus

$$U_E = I_E (3 I_{0Fr} r_{Fr} + 3 I_{0KA} r_{KA} + 3 I_{0KB} r_{KB}).$$

Fließen bei gleicher Summe der der Station zufließenden Hauptleiterströme oder gleicher Nullstromsumme der Hauptleiter diese Nullströme einmal nur über eine Freileitung mit hohem Reduktionsfaktor, bei einer anderen Netzkonstellation nur über ein Kabel mit kleinem Reduktionsfaktor zu, so ergeben sich auch bei gleichem Fehlerstrom sehr verschiedene Erderspannungen. Diejenige beim Kabel ist entsprechend dem kleineren Reduktionsfaktor des Kabels geringer.

Auch die Bemessung der sogenannten Erdungsleitungen — der außerhalb des Erdreiches oder isoliert im Erdreich liegenden Leitungen der Erdungsanlage — ist bei Mittelspannungsnetzen ebenso wie bei Netzen ab 110 kV von der Art der Sternpunktbehandlung abhängig. Bei isoliertem Sternpunkt oder Erdschlußblöschung im Netz muß ja eine Erdungssammelleitung (d. h. eine Erdungsleitung, die mit mehreren anderen Erdungsleitungen zusammengeschlossen ist) für den Doppelerdschluß bemessen sein [4]. Bei Erdung von Sternpunkten über strombegrenzende Widerstände wäre, wie erwähnt, auch eine Schnellabschaltung zu fordern. Dann braucht das Entstehen eines zweiten Erdschlußpunktes noch in der kurzen Zeit von der Bildung der ersten Fehlerstelle bis zur vorgesehenen Abschaltung ebenso wenig berücksichtigt werden, wie z. B. bei unmittelbarer Sternpunktterdung ab 110 kV [5].

Dies würde bedeuten, daß die erforderlichen Querschnitte der Erdungssammelleitungen für Anlagen mit höherer Kurzschlußleistung bei Erdung von Netzsternpunkten über größere strombegrenzende Widerstände geringer wären als bei Erdschlußblöschung. Bild 3 läßt diese Verringerung der erforderlichen Querschnitte bei Verminderung der zugrunde liegenden Strombelastung erkennen. Auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Doppelerdschlusses mit einem Fußpunkt innerhalb des Bereichs der Erdungsanlage und einem Fußpunkt außerhalb [6] würde bei einer kurzen Gesamtausschaltzeit kaum noch bestehen.

Schrifttum

- [1] VDE 0141/11. 58, Abschnitt V.
[2] VDE 0141/11. 58, § 27, 1. Absatz.

- [3] Feist, K.-H.: Die Erderspannung geerdeter stromdurchflossener Leiter bei Wechselstrom niedriger Frequenz und ihr elektrisches Strömungsfeld im Erdreich. Diss. TH Hannover, Oktober 1958, S. 73—74.
[4] VDE 0141/11. 58, § 13b2.
[5] VDE 0141/11. 58, § 13b1.
[6] Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen: Technischer Bericht Nr. 177 vom 4. Mai 1956, S. 25—28 und 31—36.

E. Baumann, Dresden: Die schnelle Ermittlung der erdschlußbehafteten Anlagenteile in induktiv geerdeten Hochspannungsnetzen mit den derzeitigen wattmetrischen Erdschlußrelais bereitet Schwierigkeiten, weil die Richtungsangaben nicht immer eindeutig sind. Die Eingrenzung des Fehlerortes ist dann mit einer Vielzahl von Schalthandlungen verbunden, und es kann unter Umständen beim längeren Betrieb eines Netzes im Erdschluß noch zu Folgestörungen kommen. So traten auch im 110-kV-Netz des Verbundnetzes Ost trotz vorhandener wattmetrischer Erdschlußrelais beim Aufsuchen der Erdschluß-Fehlerorte Zeiten auf, die nicht befriedigen konnten. Es war notwendig, die auf wattmetrischer Basis beruhenden Geräte zur selektiven Erdschlußfassung auf ihre Brauchbarkeit zu untersuchen.

Aus diesem Grunde wurden 1958 in einem 110-kV-Netz Erdschlußversuche durchgeführt und dabei acht Dauererdschlüsse und ein Lichtbogenerdschluß in fünf verschiedenen Stationen bei konstanter Verformung des Netzes eingeleitet. Dabei zeigte sich, daß alle wattmetrischen Geräte, wie RER-Relais (Fabrikat EAW Treptow), RW 2-Relais (Fabrikat Siemens & Halske) und Nullwattmeter mit Anzeige der sekundären Wirkleistung keine eindeutigen Richtungsentscheidungen lieferten, so daß man nicht mit Sicherheit sofort den erdschlußbehafteten Anlagenteil feststellen konnte. Nach den Richtungsangaben wären immer mehrere Leitungen erdschlußbehaftet gewesen, abgesehen von weiteren falschen Richtungsentscheidungen. Auch bei Erdschlüssen auf einer 110-kV-Stichleitung erhielt man ähnliche vieldeutige Richtungsangaben. Somit ist natürlich der Lastverteiler nicht in der Lage, sofort auf den erdschlußbehafteten Anlagenteil zu schließen.

Bei den Erdschlußversuchen wurden in verschiedenen Stationen auch die Einschwingvorgänge des Nullstromes in der Holmgrenschaltung oszillographiert, und es konnte nachgewiesen werden, daß die ersten mittelfrequenten Stromamplituden in ihrer absoluten Höhe abhängig von der Entfernung der Erdschlußstelle sind. Man braucht also nur in jedem Leitungsabzweig ein Meßgerät, das die Höhe der mittelfrequenten Stromamplitude mißt, um aus den Anzeigen den erdschlußbehafteten Anlagenteil ermitteln zu können. Ein derartiges Meßgerät wurde von Woischytzky entwickelt (WP 21 e/52 596, Zusatzpatent WP 21 e/58 417 und DP Nr. V 15 706/VIII c/21 e).

Die Wirkungsweise des Meßgerätes ist folgende: Von der Holmgrenschaltung der Stromwandler wird der Einschwingstrom einem Hilfswandler zugeführt und in eine stromproportionale Spannung umgeformt. Diese Spannung wird gleichgerichtet und lädt einen Kondensator auf. Nach einer bestimmten Zeitverzögerung wird der Kondensator vom Gleichrichter getrennt und an eine Laufzeitkette geschaltet, die mit einem Meßinstrument abgeschlossen ist. Der Kondensator entlädt sich über das Meßinstrument. Hat der Zeiger des Instrumentes seinen maximalen Ausschlag erreicht, so wird er durch einen eingebauten Fallbügel in der Anzeigestellung festgehalten. Die Anzeige kann nach einer beliebig langen Zeit abgelesen werden. Durch Drücken einer Quittiertaste wird der Zeiger freigegeben, und er kann wieder in die Nullstellung zurückgehen. Das Meßgerät ist dann für einen neuen Meßvorgang bereit. Solange der Zeiger in der Anzeigestellung durch den Fallbügel festgehalten wird, kann ein wiederholter Erdschluß oder der Übergang zum Doppelerdschluß nicht gemessen werden, damit Fehlanzeigen vermieden werden. Für die Messung des

Summenstromes in der Holmgrenschaltung braucht man die Kerne der Stromwandler nicht mehr genau abzugleichen, weil die mittelfrequenten Einschwingströme in der Größenordnung von einigen hundert Ampere liegen. Die Meßfehler der Wandler fallen dadurch nicht mehr ins Gewicht.

Die Meßgeräte, die der Erdschlußstelle am nächsten liegen, haben den größten Zeigerausschlag, so daß sofort eindeutig die erdschlußbehaftete Leitung oder Anlage festgestellt werden kann. Die Meßgeräte, die weiter von der Erdschlußstelle entfernt liegen, sprechen nicht an, da ein bestimmter Schwellwert des Einschwingstromes erst überschritten werden muß. Dadurch entfällt eine Vielzahl von Anzeigen, und der Lastverteiler erhält nur die Angaben, die für ihn von Bedeutung für die Ortung der Erdschlußstelle sind. Mit dem Meßgerät können alle Erdschlußwischer und Dauererdschlüsse erfaßt werden. Es ist also auch feststellbar, auf welchen Leitungen Erdschlußwischer auftreten, um vorbeugende Maßnahmen veranlassen zu können. Dies ist sehr wichtig, denn die Erdschlußwischer haben den größten Anteil von allen Erdschlüssen. So traten z. B. 1958 im Bereich des Verbundnetzes Ost im 110-kV-Netz 178 Erdschlußwischer und nur 9 Dauererdschlüsse auf.

Nachdem eine Anzahl der Meßgeräte in einem 110-kV-Netz eingebaut worden waren, hat man 1960 nochmals Erdschlußversuche durchgeführt, um die Brauchbarkeit dieser Meßgeräte zu überprüfen. Dabei wurden zwei Lichtbogen-Erdschlußwischer und zehn satte Erdschlüsse in verschiedenen Stationen und Leitungsabzweigen eingeleitet und die Einschwingströme oszillographisch aufgenommen. Die Auswertung ergab eine gute proportionale Übereinstimmung der Zeigerausschläge der Erdschlußmeßgeräte mit der Größe der mittelfrequenten Amplituden der Einschwingströme. Die Versuche haben bewiesen, daß mit den beschriebenen Erdschlußmeßgeräten eine selektive Erdschlußerfassung bei Dauerschläüssen und auch bei Erdschlußwischern gewährleistet ist. Damit ist ein Nachteil beseitigt, der bisher der induktiven Sternpunktterdung (Erdschlußlöschung) noch anhaftete.

Zur Zeit werden in Mittelspannungsnetzen und in Kabelnetzen weitere Erdschlußversuche zur Erforschung der Einschwingvorgänge vorgenommen, um das Erdschlußmeßgerät auch in diesen Netzen anwenden zu können. Zu gegebener Zeit wird über die Ergebnisse berichtet werden.

W. Bulla, Graz: Zur Frage der Sternpunktterdung in Mittelspannungsnetzen wäre noch auf das französische System der EdF¹⁾ hinzuweisen, das eine Erdung der Transformatorsternpunkte über Widerstände vorsieht, die den Erdkurzschlußstrom auf 300 A im Freileitungsnetz, auf 1000 A im Kabelnetz begrenzen. Erdschlüsse werden durch Relais im Nullstromkreis erfaßt. Der Nullstrom wird mit drei Stromwandlern in Holmgren-Schaltung gebildet. Das System erzielt rasche selektive Abschaltung von Erdschlüssen. Die Netze müssen aber in Strahlenanordnung betrieben werden und man muß auf die Vorteile der Vermaschung verzichten.

Um die von französischer Seite behauptete wirtschaftliche Überlegenheit dieses Systems über die induktive Löschung nachzuprüfen, hat man die beiden Systeme für das steirische Landesnetz verglichen. Es ergab sich, daß die Löschspulen teurer sind als die für das EdF-System erforderlichen zusätzlichen Stromwandler und Sekundärrelais, daß aber die Ausstattung aller Leitungsabgänge mit Kurz-

unterbrechungseinrichtungen das Bild umkehrt. Im gelöschten Netz kann man in vielen Fällen auf die Kurzunterbrechung verzichten, sei es, daß die Leitungen weniger gewitteranfällig sind, sei es, daß unwichtige Abzweige mit geringem Verbrauch versorgt werden. Da die Löschung eine große Anzahl von Kurzunterbrechungen vermeidet, sieht man bei uns derzeit keinen Anlaß, der Anwendung des EdF-Systems näher zu treten.

H. Schaefer, Frankfurt/M.: Die 110-kV-Verteilungsleitungen mit 16 $\frac{2}{3}$ Hz der Deutschen Bundesbahn und der Österreichischen Bundesbahnen sind galvanisch verbunden und werden gelöscht betrieben. Die gesamte Systemlänge beträgt gegenwärtig 6700 km. Die Grundschwingungsamplitude des Erdschluß-Reststromes beträgt zur Zeit rd. 70 A. Alle Stationen sind in den Leitungsabzweigen mit Erdschlußwischer-Relais ausgerüstet, deren Anzeigen bezirksweise zu einigen Schaltbefehlstellen übertragen werden.

Aus der Störungsstatistik des Jahres 1960 ergaben sich folgende Werte: Die Zahl der kurzzeitigen Erdschlußwischer betrug 279. Insgesamt 85 % dieser Wischer dauerten weniger als 1 s. Weitere 10 % der Wischer dauerten 1 bis 2 s. Somit lagen 95 % der Wischer unter 2 s. Die Zahl der Doppelerdschlüsse betrug 8 und die Zahl der Dauererdschlüsse 11 (z. B. Kettenbrüche, Seilbrüche).

Die Erfahrung hat gezeigt, daß bei dem Umfang der Leitungsanlagen die Handabschaltung der Dauererdschlüsse auf Grund der Anzeige der Erdschlußwischer-Relais nicht immer genügend schnell und zuverlässig stattfinden kann. Im Unterwerk der Deutschen Bundesbahn Steinbach a. W. ist daher seit mehreren Jahren eine Automatik zur schnellen selektiven Abschaltung von Dauererdschlüssen eingebaut, die in solchen Fällen den erdschlußfreien Leiter nach etwa 5 s kurzzeitig auf Erde schaltet und damit einen künstlichen Doppelerdschluß einleitet, der den Netzschutz anregt. Diese Einrichtung hat im Jahre 1960 15mal angesprochen. Davon entfielen 11 Abschaltungen auf Dauererdschlüsse und 3 Abschaltungen auf länger stehende Erdschlußlichtbögen. Ein Fall blieb ungeklärt. Eine Handabschaltung von Dauererdschlüssen ist nur noch in sehr seltenen Fällen bei besonders hohen Erdübergangswiderständen notwendig.

Die Automatik Steinbach a. W. ist mit Stromschreibern ausgerüstet, welche die künstlichen Doppelerdschlüsse nach Zeitpunkt und Stromhöhe erfassen. Die Stromstärken liegen bei Werten von maximal 1200 bis 1400 A. Auch geringere Werte bis hinab zu 700 A wurden festgestellt. Durch die Lage des Unterwerkes Steinbach a. W. am Ende eines Netzausläufers werden die künstlichen Doppelerdschlußströme stark herabgesetzt. Die Kurzschlußleistung liegt derzeit bei 1200 MVA.

Die Löschfähigkeit ist als gut zu bezeichnen. Nur in seltenen Fällen führen Erdschlußwischer zu Überschlägen der gesunden Phase und damit zu Doppelerdschlüssen. Die Erdschlußwischer sind auf den Leitungen sehr ungleichmäßig verteilt. Bestimmte Leitungen neigen bevorzugt zu Wischern. Wir haben jedoch festgestellt, daß auf Leitungen mit verstärkter Isolation und Leitungen mit nicht sprühenden Lichtbogenschutzarmaturen Erdschlußwischer selten oder gar nicht auftreten. Für neu zu bauende und umzubauen Leitungen werden daher künftig nur noch koronafreie Lichtbogen-Schutzarmaturen verwendet. Auf Grund der Betriebserfahrungen darf man annehmen, daß die gute Löschfähigkeit dieser 110-kV-Leitungen auch bei den noch bevorstehenden Erweiterungen des elektrisch betriebenen Streckennetzes erhalten bleiben wird.

1) EdF = Electricité de France.

RUNDSCHAU

DK 621.315.553.081.7

Untersuchung über die Eignung von „Centanin“-Drähten für Präzisionswiderstände. Nach *Hetzel, W.*, u. *Melchert, F.*: Z. Instrum.-Kde. Bd. 68 (1960) S. 264–270; 10 B., 2 Taf., 6 Qu.

Verschiedene Drähte aus Centanin (dem Manganin ähnliche Legierung mit einem spezifischen Widerstand von etwa $1 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ bei 20°C) wurden im Hinblick auf ihre Eignung für Präzisionswiderstände systematisch untersucht. Dazu wurden die Auswirkungen der mechanischen Verformung, der Erwärmungs- und Abkühlungsbedingungen sowie der chemischen Oberflächenbehandlung auf den Temperaturverlauf des spezifischen Widerstandes festgestellt. Jede Probe unterlag, wie bei der Fertigung von Präzisionswiderständen aus Manganin üblich, einer einmaligen Wärmebehandlung.

Die Widerstands-Temperatur-Kurven haben im interessierenden Bereich von etwa 15 bis 50°C den von Manganin her bekannten parabelförmigen Verlauf, wobei sich die Kurvenform für alle untersuchten Proben als gleich und unabhängig von der Vorbehandlung erwies. Dagegen wird die Lage der Kurven im Widerstands-Temperatur-Diagramm in annähernd vorherzusehender Weise von der Vorbehandlung beeinflusst. Bei Widerständen aus weichem Centanindraht kann die Wärmebehandlung je nach der Alterungstemperatur und -dauer eine Verschiebung des Maximums der Widerstands-Temperatur-Kurve nach größeren oder kleineren Werten hin, in einigen Fällen aber auch keine Änderung bewirken. Bei harten, kaltverformten Drähten wird im allgemeinen der Verformungseinfluß viel größer sein. Von wesentlichem Einfluß auf den Widerstands-Temperatur-Verlauf ist die Geschwindigkeit der Abkühlung nach einer Wärmebehandlung. Bei raschem Abkühlen oder Abschrecken wird ein noch weitgehend ungeordneter Gefügestand „eingefroren“, wodurch sich ein höherer spezifischer Widerstand und eine Verschiebung des Maximums der Widerstands-Temperatur-Kurve nach kleineren Werten hin ergibt. Eine schnelle Abkühlung tritt auch auf, wenn nach Erwärmung eines Drahtwiderstandes durch höhere Strombelastung der Strom plötzlich ausgeschaltet wird.

Der Widerstands-Temperatur-Verlauf bei Centanin wird durch Atzen mit Chromschwefelsäure praktisch nicht verändert, während bei Manganin durch gleichartige Oberflächenätzung die Kurven stark verschoben werden. Der Unterschied ist darauf zurückzuführen, daß Centanin zunderbeständiger ist als Manganin und außerdem die bei Centanin entstehenden Oberflächenschichten eine sehr geringe elektrische Leitfähigkeit haben, während sie bei Manganin in stärkerem Maße an der Leitung beteiligt sind.

Zum Prüfen auf zeitliche Konstanz wurde der Gleichstromwiderstand von verschiedenen vorbehandelten Widerständen über zwei Jahre überwacht. Bei Innehaltung bestimmter Bereiche von Alterungstemperatur und -dauer und Berücksichtigung der Korrosionsempfindlichkeit durch Lackieren der Oberfläche können Präzisionswiderstände ausreichender Konstanz aus Centanin hergestellt werden. *Hlk*

DK 621.317.724

Der Kine-Klydonograph, ein Gerät zur Ermittlung der Wellenform. (The kine-klydonograph. A transient waveform recorder.) Nach *Griscom, S. B.*: Trans. Amer. Inst. electr. Eng. (III) Bd. 79 (1960) S. 603–612; 18 B., 12 Qu.

Der Klydonograph, die bekannte aus Metallspitze-Isolierplatte-Metallplatte bestehende Gleitfunkenanordnung, gesteuert es, aus der Größe der Lichtenberg-Figuren die maximale Höhe der angelegten Impulsspannung auf $\pm 20\%$ des Istwertes abzuschätzen. Beim Kine-Klydonograph wird nun der eine Pol der Impulsspannung sowohl an die Platten-elektrode als auch an eine reflektionsfreie Verzögerungsleitung gelegt. Acht gleichmäßig über diese Leitung verteilte Abgriffe sind zu entsprechenden Spitzenelektroden geführt. Der andere Pol liegt am Mantel der Verzögerungsleitung und am Gehäuse. Trifft auf diese Anordnung eine Impulsspannung, so entsteht eine Reihe von Entladungsfiguren, deren zeitlicher Abstand durch die Laufzeit der Verzögerungsleitung bestimmt ist. So kann die Dauer des Impulsanstieges festgestellt werden. Eine neunte Spitzenelektrode ist mit dem Gehäuse unmittelbar verbunden, und ihre Ent-

ladungsfigur ist daher ein Maß für die maximale Impulsspannung.

Mit diesem Gerät sollen natürliche Blitzentladungen erforscht werden. Diese Entladungen haben einerseits unterschiedliche Stirndauer, andererseits vermutet man, daß vor der Hauptentladung eine kurzzeitige und sehr steile Vor-entladung stattfindet. Aus diesem Grunde hat man in dem Gerät zwei Systeme mit unterschiedlicher Verzögerung untergebracht. Das eine arbeitet mit einer $50\text{-}\Omega$ -Leitung von $8 \text{ mal } 0,05 \mu\text{s}$ (fast response network), das andere über ein dämpfendes RC-Glied (1880Ω , 1000 pF) mit einer LC-Kette (2 mH , 500 pF) von $8 \text{ mal } 1 \mu\text{s}$ (slow response network). Die Spitzenelektroden berühren die Emulsionsschicht eines austauschbaren Films von $20 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$.

Der Apparat wird auf Freileitungsmasten montiert. Der Blitzstrom gelangt über eine 5-m -Stabantenne zum Meß-Nebenschlußwiderstand von $0,5 \Omega$. Von hier wird das $50\text{-}\Omega$ -System über einen $10\text{-}\Omega$ -Widerstand gespeist, das LC-System über einen Spannungsteiler. Eine 60-kV -Schutzfunkenstrecke begrenzt den Meßbereich auf 120 kA . Das $50\text{-}\Omega$ -System ist durch eine 20-kV -Funkenstrecke geschützt. Die ganze Ausrüstung wiegt 50 kg , das Meßgerät allein 8 kg .

Die Idee zu diesem Gerät ist bestechend. Aber in der Praxis wird es schwer sein, die Anzeige auszuwerten. Diese ist nämlich nicht eindeutig. Das schnelle $50\text{-}\Omega$ -System reagiert auf jeden steilen Spannungsanstieg, gleichgültig, wo er zeitlich liegt. An den Meß-Nebenschlußwiderstand sind die höchsten Anforderungen zu stellen, da z. B. eine Eigeninduktivität von 10^{-6} H bei einer Stromänderung von $10 \text{ kA}/\mu\text{s}$ bereits eine Spannung von 10 kV erzeugt. *Bgd*

DK 621.313.12.001.57 : 536.6

Zwei Ergänzungen zur Wärmequellen-Netzmethode. Nach *Hak, J.*: Arch. Elektrotechn. Bd. 45 (1960) S. 407–417; 10 B., 6 Qu.

In einigen Fällen, bei denen die Quelle nur einfach mit dem übrigen Netz zusammenhängt, ist es möglich, schon während des Entwurfs des Wärmequellen-Netzes, das eine elektrische Maschine abbilden soll, einige der Quellen aus der Rechnung zu eliminieren. Die Vereinfachung besteht darin, daß man die Ergiebigkeit von einer oder zwei benachbarten Quellen erhöht und bestimmte Abkühlungs-Wärmewiderstände zufügt. Der Grad der Determinante des Gleichungssystems kann dadurch im voraus erniedrigt werden. Wickelköpfe als Wärmequellen, die fast immer mit dem übrigen Wärmequellen-Netz der Maschine nur durch einen inneren axialen Wärmewiderstand verbunden sind, können in dieser Weise behandelt werden. Der Verfasser erläutert dann die Zusammensetzung der Wärmewiderstände bei Quellen mit zweifacher Verbindung für den Fall, daß die Quelle wärmeunabhängig ist oder als solche betrachtet wird, daß sie nicht durch die Umgebung gekühlt ist und daß sie sich in einen Widerstandsknotenpunkt des Netzes verwandelt.

Ohne auf die physikalischen Grundlagen der zusätzlichen Eisenverluste näher einzugehen, wird zur Berücksichtigung der an einigen Wärmequellen des Netzes stehenden Oberflächenverluste auf Grund der eindimensionalen Lösung der Wärmeströmung eine einfache Regel abgeleitet: mit Hilfe einer erhöhten Umgebungstemperatur können solche Oberflächenverluste in die Rechnung eingeführt werden. Im Wärmequellen-Netz erscheinen dann gewisse innere Wärmewiderstände, deren Berechnung für den Fall eines Stabes angegeben wird. Gewisse innere Wärmewiderstände können nur durch eine schrittweise Näherung genau bestimmt werden, weil sie auch von den im voraus nicht bekannten Temperaturen benachbarter Quellen abhängig sind.

Als Beispiel wird die Temperaturverteilung und die Wärmeströmung im Läuferzahn einer Drehstrommaschine mit Berücksichtigung der Oberflächenverluste berechnet, welche die Zahntemperatur und besonders die Temperatur der Zahnkopfoberfläche beträchtlich erhöhen. Sie können infolgedessen die Wärmeströmung im Luftspalt stark beeinflussen und die Läuferkühlung ungünstig beeinträchtigen. Die aus der Praxis bekannte Tatsache kann mit Hilfe des Wärmequellen-Netzes bewiesen und der Berechnung zugänglich gemacht werden. *Hlk*

VERBANDSNACHRICHTEN

VDE

Verband Deutscher Elektrotechniker

Frankfurt a. M. S 10, Stresemannallee 21
Fernruf: 60 341; Fernschreiber (Telex): 04-12 871;
Telegramm-Kurzanschrift: Elektrobund;
Postscheckkonto: Frankfurt a. M. 388 68.

Inkraftsetzung von VDE 0510/11.61 „Bestimmungen für Akkumulatoren und Akkumulatoren-Anlagen“

Gegen den in ETZ-A Bd. 81 (1960) S. 440 angekündigten Entwurf einer Neufassung von VDE 0510 sind Einsprüche eingegangen. Diese wurden von der VDE-Kommission „Akkumulatoren“ unter Vorsitz von Direktor Dipl.-Ing. M. Pöhler inzwischen ordnungsgemäß behandelt; der Entwurf wurde entsprechend geändert. Die so entstandene Schlußfassung hat der Vorstand des VDE im September 1961 genehmigt. Sie gilt ab 1. November 1961. Die bisherigen Vorschriften VDE 0510/4.52 werden am gleichen Tage ungültig.

Einzeldrucke der Neufassung können unter der Bezeichnung VDE 0510/11.61 vom VDE-Verlag, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, zum Preise von 4,60 DM bezogen werden.

Verband Deutscher Elektrotechniker
Der Generalsekretär
Lauster

Erteilung vorläufiger VDE-Zeichengenehmigungen

Gemäß dem in ETZ-A Bd. 80 (1959) S. 314 bekanntgegebenen Verfahren zur Erteilung vorläufiger Zeichengenehmigungen wird die VDE-Prüfstelle durch die VDE-Kommission „Installationsmaterial“ ermächtigt, vorläufige Zeichengenehmigungen zur Führung des VDE-Zeichens auf Grund des Entwurfes VDE 0616 m/...61 zu erteilen.

Der Entwurf VDE 0616 m/...61 ist in ETZ-A Bd. 82 (1961) H. 18, S. 585, veröffentlicht.

Der Kommissionsvorsitzende VDE-Vorschriftenstelle
Lindner Weise

Berichtigung zu VDE 0712 Teil 2/4.61

In den oben genannten Vorschriften sind versehentlich die Prüfbestimmungen für Vorschaltgeräte, die zum Aufbau, jedoch nicht zum Einbau bestimmt sind, und die als unabhängiges Zubehör gemäß Teil 1 § 6 b) 7.1 das Zeichen \oplus tragen müssen, aus VDE 0712 Teil 2/4.57 nicht mit übernommen worden.

Im einzelnen ist in VDE 0712 Teil 2/4.61 folgendes nachzutragen:

Zu Teil 1 § 12 c) 2.

Nach „... deren Höhe oder Breite größer als 100 mm ist“ ist einzufügen:

mit Ausnahme solcher, die das Zeichen \oplus tragen,

Zu Teil 1 § 12 c) 3.

Es ist hinzuzufügen:

3. Vorschaltgeräte, die das Zeichen \oplus tragen, werden in der zugehörigen Abdeckung und in einer aus 3 mattschwarz gestrichenen Sperrholzplatten von 15 mm Dicke und mindestens 50 cm Länge und Höhe gebildeten Prüfecke geprüft. Die Sperrholzplatten sind so angeordnet, daß sie gewissermaßen zwei Seitenwände und die Decke eines Raumes bilden, bei dem der Boden und die übrigen 2 Seitenwände fehlen. Wände und Decke sollen alleseits mindestens 25 cm über das Gehäuse des Vorschaltgerätes vorstehen. Die zu prüfenden Geräte werden an der Decke der Prüfecke und so dicht wie möglich an den Wänden angebracht.

Zu Teil 1 § 12 d) 2.

Nach dem 6. Absatz von d) 1. wird eingefügt:

2. Bei Vorschaltgeräten, die das Zeichen \oplus tragen, darf die Übertemperatur der ungünstigsten Stelle der Oberfläche des Vorschaltgerätes gegenüber der Raumtemperatur 60 grd nicht überschreiten.

Danach folgen als 2. Absatz von d) 2. der bisherige letzte Absatz auf Seite 12:

Wenn auf den Vorschaltgeräten eine von 40 °C abweichende Raumtemperatur angegeben ist

sowie der anschließende kleingedruckte Absatz auf Seite 13:

Wenn z. B. auf dem Gerät

Zu Teil 1 § 12 e) 2.

Als 2. Absatz ist einzufügen:

Bei Vorschaltgeräten, die das Zeichen \oplus tragen, darf die Übertemperatur der ungünstigsten Stelle der Oberfläche des Vorschaltgerätes gegenüber der Raumtemperatur 100 grd nicht überschreiten.

Zu Teil 1 § 17 b)

Als 2. Absatz ist einzufügen:

Vorschaltgeräte, die das Zeichen \oplus tragen, werden während der Prüfung frei auf eine nicht metallische Platte gelegt.

Sonderdrucke dieser Berichtigung können kostenlos vom VDE-Verlag bezogen werden. Die Abonnenten des Ergänzungsabonnements haben sie bereits mit der September-Lieferung erhalten.

Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE) e. V.

VDE-Verlag GmbH, Berlin-Charlottenburg 2

Einspruchsfristen zu Entwürfen von VDE-Bestimmungen

VDE 0616 m/...61 „Lampenfassungen und -sockel bis 750 V“, angekündigt in ETZ-A Bd. 82 (1961) H. 18, S. 585, Einspruchsfrist bis 1. November 1961.

VDE 0550 Teil 1 b/...61 „Kleintransformatoren“, angekündigt in ETZ-A Bd. 82 (1961) H. 19, S. 616, Einspruchsfrist bis 31. Oktober 1961.

VDE 0720 Teile 1 a, 2 a, 3 a, 4 a (Entwürfe 2) „Elektrowärmegeräte für den Hausgebrauch“, angekündigt in ETZ-A Bd. 82 (1961) H. 19, S. 616, Einspruchsfrist bis 31. Oktober 1961.

VDE 0730 Teile 1 b und 2 b (Entwürfe 2) „Geräte mit elektromotorischem Antrieb für den Hausgebrauch“, angekündigt in ETZ-A Bd. 82 (1961) H. 19, S. 616, Einspruchsfrist bis 31. Oktober 1961.

Mitteilungen der VDE-Bezirksvereine

50 Jahre VDE-Bezirksverein Nordbayern

Der VDE-Bezirksverein Nordbayern, vormals Elektrotechnische Gesellschaft Nürnberg, bestand am 13. Januar 1961 genau 50 Jahre. Die Mitgliederzahl des Vereins hat sich in dieser Zeit von 64 auf über 1000 erhöht. Schon vor Jahren wurden Zweigstellen des Bezirksvereins in Amberg, Bayreuth, Erlangen, Regensburg und Würzburg gebildet, um auch dort regelmäßige Veranstaltungen durchführen zu können.

Das bevorstehende Jubiläums-Vortragsjahr wird am 20. Oktober mit einer musikalisch umrahmten, festlichen Sitzung im Lessing-Theater Nürnberg eröffnet, zu der zahlreiche namhafte Gäste aus Wirtschaft, Technik und Wissenschaft erwartet werden. Eine im VDE-Verlag erschienene 180 Seiten starke Festschrift mit 27 Fachveröffentlichungen aus dem Mitgliederkreis des Bezirksvereins stellt einen anschaulichen Querschnitt der vielgestaltigen Elektrotechnik Nordbayerns dar und soll darüber hinaus ein Beispiel sein für die ernsthafte Berufsarbeit und das technische Denken innerhalb des vor 50 Jahren gegründeten Bezirksvereins.

VERANSTALTUNGSKALENDER

Aachen: VDE-Bezirk Aachen, Lagerhausstr. 23-27.

26. 10. 1961, 18.15, Technische Hochschule, Rogowski-Institut, großer Hörsaal: „Fehlerstrom-Schutzschaltungen“, Dr. G. Clewert, Erlangen.

Amberg: VDE-Bezirksverein Nordbayern, Zweigstelle Amberg,

Haselmühlstr. 50.

11. 10. 1961, 20.00, SSW-Gerätewerk, Amberg, Haselmühlstr. 50: „Nordwest-Olleitung Wilhelmshaven-Köln — eine fernüberwachte und ferngesteuerte Erdöl-Transportleitung“, Dipl.-Ing. O. Schuhmacher, Erlangen.

Bonn: VDE-Bezirk Köln, Zweigstelle Bonn, Immenburgstr. 7-11.

24. 10. 1961, 19.00, Fernmeldeamt, Unterrichtsraum, Reuterstr. 65: „Maximale Lichtbogenentwicklung und Stromulldurchgänge bei Niederspannungsschaltgeräten — mit der Zeitdehnerkamera gesehen“, Dr. O. Loh, Neuß.

Essen: ETV des Rheinisch-Westfälischen Industriebezirks Essen,

Hagen i. Westf., Körnerstr. 40.

10. 10. 1961, 16.30, Haus der Technik, Hörsaal B, Hollestr. 1 a: „Moderne Trägerfrequenztechnik“, Oberpostrat Dipl.-Ing. J. Böwering, Dortmund.

Hamburg: VDE-Bezirk Hamburg, Gerhart-Hauptmann-Platz 48.

19. 10. 1961, 17.30, Museum für Völkerkunde, großer Vortragssaal, Rothenbaumchaussee 64: „Entwicklungstendenzen in der Meßtechnik“, Obering. L. Brandenburger, Karlsruhe.

Hannover: ETG Hannover, Bischofsholer Damm 70.

24. 10. 1961, 18.15, Technische Hochschule, Hörsaal 42: „Der Hochspannungs-Schaltanlagenbau und die neuen Errichtungsvorschriften VDE 0101“, Dir. Obering. B. Fleck, Frankfurt a. M.

Kassel: VDE-Bezirksverein Kassel, Scheidemannplatz 1.

19. 10. 1961, 18.00, Hessisches Landesmuseum, Hörsaal: „Statistische Auswertung von Störungen in Industrieanlagen zur Erhöhung der Betriebssicherheit“, Dipl.-Ing. K. H. Lopitzsch, Mannheim.

Köln: VDE-Bezirk Köln, Köln-Riehl, Amsterdamer Str. 192.

13. 10. 1961, 18.00, Staatliche Ingenieurschule, Ubierring 48: „Ziele und Grenzen der Bildungshilfe für Entwicklungsländer — Neue Aufgaben für die Kulturarbeit des Auswärtigen Amtes“, Dr. D. Sattler, Bonn.
21. 10. 1961 Besichtigung des Großrohrwerkes Mannesmann-Hoesch-GmbH in Duisburg-Mündelheim. Die Teilnehmerzahl wird auf 40 Personen beschränkt. Es ergehen noch besondere Einladungen. Bei genügender Beteiligung wird ein Omnibus gemietet werden, der um 7.30 ab Köln, Barbarossaplatz, fahren wird. Die Besichtigung des Großrohrwerkes beginnt zwischen 9.00 und 9.30 vom Verwaltungsgebäude in Duisburg-Mündelheim aus.

27. 10. 1961, 18.00, Staatliche Ingenieurschule, Ubierring 48: „Kurzwellen-antennen und ihre elektrische Berechnung“, Dipl.-Ing. F. Behne, Mannheim.

München: ETV München, München 8, Rosenheimer Str. 5.

16. 10. 1961, 18.00, Deutsches Museum, Vortragsaal 2: „Physikalische Probleme bei der Entwicklung und Fertigung von Schutzgaskontakten“, Dipl.-Phys. R. Volkmann, Frankfurt a. M.

Münster: ETV des Rheinisch-Westfälischen Industriebezirks Essen, Zweigstelle Münster, Herwarthstr. 6-8.

19. 10. 1961, 19.30, Ingenieurschule für Bauwesen, Physiksaal, Lotharingerstraße: „Kontaktilose Steuerungen für die Industrie“, Dipl.-Ing. F. Fröhr, Erlangen.

Neheim-Hüsten: VDE-Bezirk Bergisch Land, Zweigstelle Neheim-Hüsten, Heidestr. 4, i. Hs. Lenze KG.

19. 10. 1961, 20.00, Hotel Egen, Mendener Str. 15: „Der heutige Entwicklungsstand von elektrischen Lichtquellen“, Dipl.-Ing. Saatmann.

Nürnberg: VDE-Bezirksverein Nordbayern, Nürnberg, Keßlerstr. 40.

20. 10. 1961, 19.30, Lessing-Theater, Nürnberg: Festsitzung „50 Jahre VDE-Bezirksverein Nordbayern“ mit Vortrag „Das Elektron in der heutigen Physik und Technik“, Prof. Dr. rer. nat. R. Fleischmann, Erlangen.

Regensburg: VDE-Bezirksverein Nordbayern, Zweigstelle Regensburg, Einhauserstr. 9.

13. 10. 1961, 20.00, Ingenieurschule Regensburg, Prüfeningerstr. 58: „Bau einer Höchstspannungs-Freileitung“, Dipl.-Ing. W. Reuther, Mannheim.

Würzburg: VDE-Bezirksverein Nordbayern, Zweigstelle Würzburg, Sterenstr. 1.

9. 10. 1961, 18.00, UWU, Vortragssaal „Elektroberatung“, Kaiserstr. 29: „Anwendung von Gießharzen im Hochspannungsschaltgerätebau“, Dipl.-Ing. G. Lüllwitz, Berlin.

Essen: Haus der Technik, Essen, Hollestr. 1.

13. 10. 1961, 17.00—18.30, Haus der Technik, Hörsaal D: Kursus „Regelungstechnik“ — Teil II a —, Baurat Dipl.-Ing. K. H. Müller-Ihlbrook, Essen.

18. 10. u. 19. 10. 1961, 14.30—19.00, Haus der Technik, Hörsaal C: „Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mit Ultraschall“, Dr. W. Grabendorfer, Dipl.-Phys. H. Weber, Köln.

24. 10. 1961, 15.00—17.30, Haus der Technik, Hörsaal B: „Röntgenographische Analysen-Verfahren“, Dr. rer. nat. H. Neff, Karlsruhe und Dipl.-Phys. H. Schuon, Karlsruhe.

Wuppertal: Technische Akademie Bergisch Land, Wuppertal-Elberfeld, Hubertusallee 18.

16. 10. bis 18. 10. 1961, 9.00—17.00, Technische Akademie, Hubertusallee 18: „Die Gasturbine in der Energieversorgung“, Dipl.-Ing. H. Reimer, Hannover.

PERSÖNLICHES

B. Fleck. — Obergeringenieur Botho Fleck, Direktor bei der Continental-Elektroindustrie AG, Voigt & Haefner, Frankfurt a. M., erhielt von der TH Hannover einen Lehrauftrag für das Fachgebiet „Theoretische Grundlagen und Anwendungen des Hochspannungs-Schaltanlagenbaues“.

H. J. Lindner. — Dr.-Ing. Hans Joachim Lindner, Bamberg, stellvertretender Vorsitzender des Verbandes Deutscher Elektrotechniker, wurde am 25. August 1961 mit dem Verdienstkreuz I. Klasse des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland ausgezeichnet, damit ist seine der Allgemeinheit dienende Tätigkeit auf dem Gebiet der Elektrotechnik gewürdigt worden.

A. Obermoser. — Am 29. Juli 1961 beging Fabrikant Albert Obermoser seinen 70. Geburtstag.

Nach Abgang von der höheren Schule ging er in die USA, wo er sich in verschiedensten Betrieben ein vielseitiges Wissen und Können erwarb. Schon hier führte ihn sein Weg zu den beiden Gebieten, die später seine ganze Arbeit bestimmen sollten, zum Elektromotor und zum Getriebebau. Nach seiner Rückkehr übernahm er den väterlichen Handwerksbetrieb. Bereits 1912 gründete er eine eigene Firma, die heutige Motorenfabrik Obermoser.

Seine schöpferische Begabung, verbunden mit seiner handwerklichen Geschicklichkeit, sein Fleiß und seine Ausdauer, verhalfen ihm aus kleinen Anfängen, ein Werk aufzubauen, das bald in allen Fachkreisen anerkannt wurde.

Frühzeitig erkannte er die Bedeutung eines Antriebsesementes mit niedriger Drehzahl, und er wurde so zu einem Pionier des Baues von Getriebemotoren. Unbeirrt trotz mancher Rückschläge verfolgte er sein Ziel, den Betrieb fortschrittlich, krisenfest und sozial weiter auszubauen. Zahlreiche Erfindungen auf allen Gebieten der Antriebstechnik und des Klein-Werkzeugmaschinenbaues brachten ihm den Ruf eines hervorragenden Fachmannes ein. Bis

zum heutigen Tage steht er inmitten seiner 500 Mitarbeiter in den beiden Werken Bruchsal und Miesbach und bestimmt mit viel Umsicht und größtem menschlichem Verständnis den Weg und weiteren Aufbau seines Unternehmens.

Schroers, H. — Am 21. Juli 1961 beging Obergeringenieur Hans Schroers, Inhaber des gleichnamigen Ingenieurbüros in Hannover, seinen 75. Geburtstag. Geboren in Krefeld, verschrieb er sich schon im Jahre 1900 der aufblühenden Elektrotechnik. Nach praktischer Tätigkeit bei Siemens, Hamburg, und der Hapag absolvierte er die Rheinische Ingenieurschule in Bingen und trat dann in die Dienste der Nassauischen Elektrizitäts GmbH, wo er komplette Anlagen für Elektrizitätswerke projektierte und baute. Vor größere Aufgaben stellten den jungen Ingenieur später die AEG, das Sachsenwerk und, anfänglich als Bauleiter, die Pöge-Elektrizitäts-AG. Nach aktiver Teilnahme am ersten Weltkrieg als Ingenieur des Scheinwerferzuges einer Infanteriedivision im Westen übertrug ihm die Firma Pöge die Leitung ihres in Hannover neu errichteten Verkaufsbüros unter gleichzeitiger Ernennung zum Obergeringenieur. Der Drang zur Selbständigkeit führte 1923 zur Schaffung eines eigenen Ingenieurbüros, das sich im Kreise der Niedersächsischen Wirtschaft großen Ansehens erfreut und das der Gründer als erfahrener Fachmann auch heute noch leitet.

Die 1920 in Hannover tagende Hauptversammlung des VDE sah Schroers als junges VDE-Mitglied, sieben Jahre später wurde er ehrenamtlicher Schriftführer der Elektrotechnischen Gesellschaft Hannover e. V. im VDE. Bis zum heutigen Tage widmet er sich dieser Aufgabe. Seiner Initiative ist es zu danken, daß sich der VDE und die ETG Hannover nach dem zweiten Weltkrieg bereits in den Jahren 1946/1947 wieder neu zusammengeschlossen haben. An ihrem Wiederaufbau hat er erfolgreich mitgearbeitet. Bei der Organisation und Durchführung der VDE-Jahresversammlung 1951 in Hannover hat er Hervorragendes geleistet. Seine großen Verdienste fanden Dank und Anerkennung in der Ehrenmitgliedschaft der ETG, die ihm 1954 verliehen wurde. Schroers ist Inhaber der silbernen und goldenen VDE-Ehrennadel und Delegierter der ETG Hannover bei der Delegiertenversammlung des VDE.

Seine stets aufopfernde und uneigennützte Mitwirkung in dieser elektrotechnischen Gemeinschaftsarbeit, sein lebendiges Interesse und sein Idealismus sollten für die jüngere Generation beispielhaft sein. Ihm, dem stets einsatzbereiten Hüter der Ziele des VDE, sei auch weiterhin Gesundheit beschieden als das echte Fundament für stete Zufriedenheit im beruflichen Alltag, den er als immer aktiver Mann nicht missen kann, und für das Glückliche auch im trauten Kreis. Die ihm immer am Herzen liegende ETG Hannover ist ihrem Ehrenmitglied in tiefer Dankbarkeit verbunden.

BÜCHER

DK 621.316.7

Regelungstechnik. Kurze Einführung am Beispiel der Drehzahlregelung von Wasserturbinen. Von G. Hutarew. 2. Neubearb. Aufl. Mit 192 S., 196 B., Format 16 cm × 23,7 cm. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1961. Preis Ganzln. 21,— DM.

Das 1955 erschienene Werk über „Regelungstechnik“ [ETZ-A Bd. 77 (1956) S. 128] liegt jetzt in zweiter Auflage im wesentlichen unverändert vor. Das Buch, das am Beispiel der Drehzahlregelung von Wasserturbinen eine Einführung für die Behandlung von Regelaufgaben bringt, ist richtungsweisend für die Darstellung der schwierigen Materie der Vorausberechnung dieser Regelvorgänge. Durch die rechnerische Behandlung der einzelnen Bauglieder eines Reglers und deren Zusammenfassung zu dem vollständigen Regler unter Benutzung von untereinander vergleichbaren Gerätekurzbildern wird eine klare und übersichtliche Vergleichsmöglichkeit verschiedener Reglertypen gegeben. Für die Überprüfung der Regler beim Hersteller und in der Anlage folgen daraus zwangsläufig die erforderlichen Verfahren, um ein ge-

wünschtes Zusammenarbeiten von Regler und Regelstrecke zu erreichen. Die gewählte Darstellung ist klar und übersichtlich, so daß einem Nichtfachmann die Einarbeitung sehr erleichtert ist, und hält sich streng an physikalische Begriffe und Ableitungen unter Benutzung der linearen Regelungstheorie. Durch die übersichtliche Darstellung vermeidet das Buch die bei vielen Arbeiten über Regelungsfragen beim Leser häufig auftretende Unsicherheit, die durch Vereinfachung schon beim Ansatz der Gleichung entsteht, deren Folgen dann im Ergebnis nicht mehr zu erkennen sind.

Der Stoff der zweiten Auflage wurde durch die Behandlung von Drehzahlmeßwerken mit I-Charakteristik erweitert. Weiter bringt sie eine Diskussion der Beiwerte der vereinfachten Regelungs-Differentialgleichung und die Messung ihrer Koeffizienten. Die Behandlung der Regelstrecke wurde durch die Behandlung des Druckstoßes bei Regelvorgängen und die Aufstellung der Differentialgleichung mit der elastischen Leitung in der ersten Periode ergänzt. In einigen Abschnitten wurde durch straffere Darstellung dem leichteren Verständnis gedient.

DK 621.372.837

Die Mikrowellenschalter als Mehrpole. H. 915 der Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. Von A. Jansen. Mit 50 S., 18 B., Format 21 cm × 30 cm. Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen 1960. Preis kart. 16,40 DM.

Die Eigenschaften von Mikrowellenschaltern, mit denen sich von mehreren möglichen diskreten Zuständen jeder beliebige Zustand einstellen läßt, können bei Betrachtung des Schalters als passiver Mehrpol durch Aufstellen einer Streumatrix angegeben werden, deren Elemente die Übertragungseigenschaften des Mehrpols in der jeweiligen Stellung eindeutig beschreiben. Die typischen Eigenschaften der Schalter können sowohl für reziproke als auch für nichtreziproke Schalter aus dem Verhalten schaltbarer Vier- und Sechspole erklärt werden. Nichtreziproke mit Ferriten aufgebaute Schalter werden in der vorliegenden Arbeit bevorzugt behandelt; sie arbeiten ohne bewegliche Teile mit sehr kurzen Schaltzeiten und werden durch sprunghafte Änderung eines statischen Magnetfeldes geschaltet. Die möglichen Schaltertypen werden kurz diskutiert und ihre frequenzabhängige Streumatrix bestimmt.

Von den Vierpolschaltern werden mechanische reziproke Schalter sowie Cutoff-Schalter, der Faraday-Rotator und nichtreziproke umschaltbare Richtungsleitungen behandelt. Bei den Sechspolschaltern kommen noch Schalter mit zwei veränderlichen nichtreziproken Phasenschiebern und magischem T sowie Schalter mit zwei reziproken Phasenschiebern und einem 3-dB-Richtkoppler sowie der Zirkulator hinzu.

Die Umschaltzeit von Ferritschaltern wird begrenzt von der Trägheit des Magnetfeldes im Innern des Ferritmediums gegenüber schnellen Änderungen der Schaltspannung. Es ist daher die Selbstinduktion der Spule herabzusetzen, und durch Aufbau der leitenden Wände aus einer dünnen Silberschicht müssen die von der zeitlichen Änderung des Magnetfeldes abhängigen Wirbelströme in den Hohlleiterwänden möglichst verringert werden.

Der Bericht, der einen guten Überblick über Mikrowellenschalter gibt, enthält im Schriftumsverzeichnis eine Zusammenstellung der wichtigsten Veröffentlichungen dieses Gebietes.

DK 621.372.837

High-frequency magnetic materials. Their characteristics and principal applications. Von W. J. Polydoroff. Mit 230 S., zahlr. B. und Taf., Format 15 cm × 23,5 cm. Verlag John Wiley & Sons, Inc., New York und London 1960. Preis Ganzln. 9,— \$.

Der Verfasser hat sich seit 30 Jahren für die Benutzung von Massekernen in der Hochfrequenztechnik eingesetzt und zuerst die Anwendung solcher Kerne zur Permeabilitätsabstimmung und für Antennenstäbe vorgeschlagen. In dieser Zeit sind die magnetischen Hochfrequenzwerkstoffe wesentlich verbessert und eine Unzahl neuer Anwendungen entwickelt worden. Nach den Worten des Verfassers gibt es kein Buch, in dem die neuen Erkenntnisse zusammengefaßt sind; der vorliegende Band soll die einander widersprechenden Ergebnisse auf diesem Gebiet klären und die Mißverständnisse über das Verhalten der magnetischen Werkstoffe richtigstellen. Auf etwa 165 Seiten werden Grundbegriffe, Herstellung von Pulvereisernen, Meßmethoden, Verluste und Anwendungen von solchen Kernen bei Frequenzen zwischen 100 kHz und 100 MHz besprochen, während den Ferriten und ihren speziellen Anwendungen etwa 50 Seiten gewidmet sind. Man bemerkt, daß das Buch von einem Praktiker geschrieben wurde: Theoretische Hintergründe werden nur angedeutet, während die praktischen Probleme aus dem Interessenkreis des Verfassers ausführlich behandelt werden. Dadurch sind die Akzente etwas willkürlich verteilt, und einige Dinge, wie etwa die neuere Entwicklung der Ferrite, haben nicht den Platz erhalten, den sie nach ihrer Bedeutung verdienen. Der Leser darf nicht erwarten, einen Überblick über den heutigen Wissensstand in ausgeglichener Zusammenfassung zu finden. Er erhält aber ein buntes Bild von den Eigenschaften der in den USA gebrauchten Werkstoffe und von der Vielfalt ihrer Anwendungsmöglichkeiten.

K. Sixtus

DK 621.375.9

Coupled mode and parametric electronics. Von W. H. Louisell. Mit 283 S., zahlr. B., Format 15,5 cm × 23,5 cm. Verlag John Wiley & Sons, Inc., New York und London 1960. Preis Ganzln. 11,50 \$.

Dieses Buch mit dem sehr speziell anmutenden Titel „Gekoppelte Schwingungsformen und parametrische Elektronik“ ist nicht nur für Elektroingenieure der Nachrichtentechnik, sondern auch für Ingenieure wichtig, die an Prinzipien allgemeiner Schwingungslehre interessiert sind. Die „Theorie gekoppelter Schwingungsformen“ wird an gekoppelten Pendeln und an gekoppelten elektrischen Leitungen als einfachen Beispielen linearer Schwingungen erläutert. Während die übliche Theorie auf gekoppelte Differentialgleichungen 1. Ordnung oder gewöhnliche Differentialgleichungen 2. Ordnung führt, wird gezeigt, daß man mit zwei gewöhnlichen Differentialgleichungen 1. Ordnung arbeiten kann, wenn man die interessierenden Größen so zu einer Normalform zusammenfaßt, daß ihre Quadrate der gespeicherten Energie entsprechen. Der Energieaustausch schwach gekoppelter Systeme aus konzentrierten Kreisen oder Leitungen und Elektronenstrahlen kann so in übersichtlicher Weise beschrieben werden.

Die behandelten Beispiele wenden sich besonders an Ingenieure und Physiker der Nachrichtentechnik. Die Kopplung von Raumladungswellen in Elektronenstrahlen mit Verzögerungsleitungen in Wanderfeldröhren und Carcinotrons wird in ihren Prinzipien deutlich.

Die zweite Hauptgruppe umfaßt die mit geringem Rauschen verbundene parametrische Verstärkung schneller Raumladungswellen. Schließlich wird eine klare Einführung in die mögliche parametrische Verstärkung mit Ferriten gegeben.

O. Zinke

DK 621.316.7+621.398

Biblioteca Științelor Tehnice IV. Bd. 2: Automatica și telecomunicații sisteme energetice. Von C. I. Penescu. Mit 574 S., zahlr. B. und Taf., Format 17,5 cm × 24,5 cm. Editura Academiei Republicii Populare Romîne, Bukarest 1960. Preis Ganzln. 35,70 lei.

Der zweite Band des umfassenden Werkes, dessen erster Band in dieser Zeitschrift — ETZ-A Bd. 81 (1960) S. 443 — besprochen wurde, bringt als 4. Teil des Gesamtwerkes die selbsttätigen Steuerungen der Elektrizitätsversorgungsanlagen. Nach einem einführenden Kapitel, in dem die Vorteile und Arten dieser automatischen Steuerungen erörtert werden, wird auf das selbsttätige Anfahren von elektrischen Motoren und Phasenschiebern eingegangen. Dabei wird dem Anlauf des Asynchronmotors besondere Aufmerksamkeit geschenkt, was den Rahmen des Werkes vielleicht überschreitet, jedoch für das Verständnis des selbsttätigen Hochlaufens von Synchronmotoren und Phasenschiebern, das darauf folgend behandelt wird, gute Dienste leistet. Sinngemäß wird weniger Raum für die Erörterung des Anlaufs von Gleichstromnebenschlußmotoren vorgesehen.

Es folgt ein Kapitel über die selbsttätige Synchronisierung der Synchronmaschinen. Nach der eingehenden Besprechung der üblichen Methoden wird auf die „Autosynchronisierung“ eingegangen, wobei die der CIGRE vorgelegten Beiträge des Verfassers, welche die Deutung der auftretenden elektromagnetischen Vorgänge betreffen, einbezogen werden.

Die beiden nächsten Kapitel behandeln das selbsttätige Einschalten der Reserve sowie die ein- und dreiphasige Kurzschlußfortschaltung, wobei außer den Merkmalen der verschiedenen Systeme die Schaltungen eingehend untersucht werden. Das Schriftumsverzeichnis umfaßt 101 Hinweise.

Alle Probleme werden rechnerisch verfolgt und an Hand des reichen Bildmaterials eingehend besprochen. Dabei fällt die große Zahl der Wirkaltungen auf, die zum gründlichen Durcharbeiten des Stoffes unentbehrlich sind.

A. Avramescu

Folgende Aufsätze erschienen in der ETZ-B vom 2. Oktober 1961
Heft 20

H. Fehling u. O. Küster: Beherrschung von Kurzschlüssen in Niederspannungsanlagen.

P. Borstelmann: Die elektrische Raumheizung, ein Belastungsproblem.

Abschluß des Heftes: 29. September 1961

Schluß des Textteiles

Schriftleitung: Frankfurt a. M. S 10, Stresemannallee 21; Fernruf 60 341, Fernschreiber (Telex) 04-12 871.

Hauptschriftleiter: Dr.-Ing. P. Jacottet (für den redaktionellen Teil verantwortlich).

Schriftleiter: Dipl.-Ing. F. Meske und Dipl.-Ing. K. Rangs.

Zuschriften für die Schriftleitung nicht an eine persönliche Anschrift, sondern nur an: Schriftleitung der ETZ, Frankfurt a. M. S 10, Stresemannallee 21.

Verlag und Anzeigenverwaltung: VDE-Verlag GmbH, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, Fernruf 34 01 41, Fernschreiber (Telex) 01-84 083.

Anzeigenleitung: Kurt Totzauer.

Bezugspreis (halbjährlich zuzügl. Zustellgebühr) 24,— DM, für VDE-Mitglieder — nur durch den VDE-Verlag — 16,— DM; Ausgabe A und B zusammen 34,— DM, für VDE-Mitglieder — nur durch den VDE-Verlag — 24,— DM. Einzelpreis dieses Heftes 2,— DM.

Druck: Deutsche Zentraldruckerei AG, Berlin SW 61, Dessauer Straße 6/7.